最新修订版

摄影镜头的性能与选择

Photographic Lenses

—— Characteristics and Guide to Purchase

沙占祥 著

中国摄影出版社

VISIT…

ISBN 7-80007-037-9

9 787800 070372 >

ISBN 7 - 80007 - 037 - 9 / J · 37

定价：28.00 元

摄影镜头的性能与选择

第三版

沙 占 祥 著

中 国 摄 影 出 版 社

图书在版编目（CIP）数据

摄影镜头的性能与选择/沙占祥著 .—北京：中国摄影出版社，2001.6
ISBN 7-80007-037-9

Ⅰ.摄… Ⅱ.沙… Ⅲ.摄影镜头－基本知识
Ⅳ.TB851

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 26277 号

责任编辑：朱传明
封面设计：沙怡梅

书　　名：摄影镜头的性能与选择
作　　者：沙占祥
出版发行：中国摄影出版社
北京东单红星胡同 61 号　邮编：100005
发行部电话：（010）65136125　传真：（010）65233658
印　　刷：北京一二〇--工厂
开　　本：32 开
印　　张：15.625
字　　数：400000
版　　次：2001 年 12 月第二版第一次印刷
印　　数：1—5000 册
书　　号：ISBN 7-80007-037-9/J·37
定　　价：28.00 元

本 书 荣 获

全国高等学校国家一级优秀教材奖
广播电影电视部高校优秀教材一等奖
全国第四届“金钥匙”优秀图书评比优胜奖

内 容 提 要

本书系统阐述了中外各类新型照相、电影、电视用摄影镜头的原理、性能、种类、特点、选购、维护等知识。本书与《摄影镜头的使用技巧》、《摄影滤光镜的性能与使用》二书共为“摄影光学丛书”姊妹篇。

全书共分六章。第一、二章介绍了摄影镜头的基本成像原理，及其在摄影实践中的巧妙运用。第三章从如何评价摄影镜头质量高低的角度，翔实深入剖析了摄影镜头的各项性能指标，及其与摄影操作和所摄影像质量的利害关系；并论述了扬长避短地使用摄影镜头，以使其潜力充分发挥出来的技巧。第四章介绍了鱼眼、短焦距、标准、长焦距、变焦距摄影镜头，以及17类特殊摄影镜头的性能特点。第五章介绍了常见摄影镜头的光学结构类型和性能。第六章详述了摄影镜头的选购原则、选购方案、挑选与检验方法，以及正确的维护方法。书中还介绍了世界几十家著名光学公司所生产的一千余种新型照相、电影、电视用摄影镜头的性能、特点及价格。

本书内容丰富、立意新颖、深入浅出、通俗易懂、图文并茂，既具有严谨的科学性、系统性、知识性、新颖性，又具有很高的学术价值和实用价值。可供广大照相、电影、电视、新闻等专业摄影工作者和业余摄影爱好者及有关技术和维修人员阅读，并作为高等院校摄影专业、新闻专业和电化教育专业教科书。

第三版前言

本人所著《摄影镜头的性能与选择》一书于 1989 年出版，所印刷的 2 万册在发行 3 个月后即售完。1990 年 4 月进行了第一次修订，此后又连续印刷了 3 次，总销售量达 8 万册。自 1992 年第 4 次印刷后，原版损坏，无法再使用，致使 1993 年后该书在全国长期脱销。由于前些年忙于教学及撰写其它著作，以至较长时间无暇修订。

近年来有大量读者来信希望购买该书，一些高等学校摄影专业也希望购买该书作为教材，而近十年来摄影镜头新技术又有了突飞猛进，涌现出了大量新技术、新产品，本人在近十年来的教学中也积累了一些新的应用知识。为满足广大读者购买《摄影镜头的性能与选择》一书的愿望，本人于 1999 年夏，暂时放下手中正从事的工作，集中精力开始了对该书的修订工作。经过一年的紧张工作，新版本的《摄影镜头的性能与选择》始全面完工。

与原版书稿相比，修订版在内容上根据近十年来摄影镜头发展的最新技术与最新产品，增加了大量新内容，尤其是增加了大量有关摄影镜头的实践性很强的应用性知识，其中有一些章节为重新撰写的。书末附录中也增加了大量最新摄影镜头的技术资料。修订版所增加的内容，有利于摄影者更全面、更深入地了解与熟悉所用摄影镜头的性能、特点，进面根据个人的爱好与经济实力，从琳琅满目的货架中挑选出最适合自己使用，品质优良，又最物有所值的产品；新增内容尤其有利于摄影者扬长避短地使用自己的摄影镜头，更好地发挥出所用摄影镜头的潜在优势，从

而拍摄出更佳、更美的理想影像来。

鉴于本人水平有限，书中缺点与不足之处在所难免，敬请广大读者指正。

作者

2000 年 9 月

于北京电影学院摄影系

第一版 前 言

随着我国国民经济的迅速发展和人民生活水平的日益提高，照相、电影、电视事业迅速发展，“摄影热”在我国逐渐兴起，并日益高涨。广大照相、电影、电视专业摄影者和业余摄影者纷纷购置了大量中外新型摄影镜头和摄影滤光镜，一些高等院校也相继设置了“摄影”专业。目前，摄影者们迫切希望系统了解这些新型摄影镜头和摄影滤光镜的原理、性能、选择、维护、使用技巧等知识，以便更好地发挥其性能，并延长其寿命；高等院校中有关照相、电影、电视等摄影专业和电化教育专业，希望能有一本科学、系统、实用的“摄影镜头”和“摄影滤光镜”高校教材；有关光学技术人员也希望了解摄影者是如何运用摄影镜头从事摄影的，以及摄影者对哪几类摄影镜头最感兴趣，以便指导设计工作。

近年来，作者除在北京电影学院摄影系讲授“摄影镜头”和“摄影滤光镜”课程外，曾应邀到中国人民大学一分校、北京师范学院、北京教育学院、中国摄影函授学院、解放军摄影函授学校等院校，以及一些部委、省市、军区和单位举办的各种“摄影进修班”，讲授“摄影镜头”和“摄影滤光镜”课程。作者以上述授课教材、讲义、讲稿的不同篇章作为基础，并结合作者多年教学经验和实践经验，分别写成了《摄影镜头的性能与选择》、《摄影镜头的使用技巧》、《摄影滤光镜的性能与使用》三本书。前者系统论述了中外新型摄影镜头的原理、性能、种类、特点、选购、维护等知识，并全面介绍了世界 38 家著名光学公司所生

TAR 73/06

产的一千一百余种照相、电影、电视用摄影镜头的性能与特点；中者详尽论述了各类摄影镜头和附件的拍摄效果、使用技巧，以及景深控制、影像清晰度控制、影像透视和透视调整等知识；后者系统阐述了摄影滤光镜与摄影特殊效果镜的种类、性能与使用知识。上述三书中提出了一些新颖、实用的论点和公式，并介绍了一些简便和行之有效的使用方法、使用技巧。

本书作为高等学校摄影、摄像、新闻、电教等专业教材，为了兼顾广大专业和业余摄影者的需要，作者在注重科学性和知识性的前提下，从实用角度出发，按循序渐进、深入浅出的原则，系统、详尽地阐述了摄影镜头的有关知识，并通过大量典型图片、表格作形象说明。

鉴于本人水平有限，书中缺点和不妥之处在所难免，敬请广大读者指正。

作者

于北京电影学院

第二版 前 言

本书第一次印刷的2万册在发行后3个月即售完，出版社决定再印2万册。为适应科学技术的新发展，本人在这次再版时根据新颁布的“国家标准”，对书中原采用的旧“部颁标准”进行了修订。

1990年4月 作者

作 者 介 绍

沙占祥　北京电影学院摄影系教授，学院学术委员会委员，国务院"政府特殊津贴"获得者，北京电影学院首届"金烛奖"获得者。兼任北京广播学院电视学院客座教授，中国摄影器材行业委员会常务委员，《照相机》、《中国摄影》、《摄影与摄像》、《人民摄影》等报刊编委，中国照相机械标准化技术委员会委员。已出版的专著：《摄影镜头的性能与选择》（荣获全国高等学校国家一级优秀教材奖、广播电影电视部高等学校优秀教材一等奖、"全国优秀图书金钥匙奖"）、《摄影镜头的使用技巧》（荣获国家级教学成果奖二等奖、广播电影电视部高等学校优秀教材一等奖、"全国优秀图书金钥匙奖"）、《中外照相机博览》（荣获"1987年全国优秀畅销书"奖）、《照相机的构造与使用》、《摄影滤光镜的性能与使用》、《照相机与摄影镜头》、《照相机及其使用》。任中央电视台《现代相机》电视系列讲座（共15集）的首席顾问及主讲。

目　录

绪论　摄影镜头的特点与发展史 …… 1
第一章　光学基础知识 …… 20
第一节　光的特性 …… 20
一、光与色 …… 20
二、人眼的特点 …… 24
三、光的加色效应与减色效应 …… 34
四、光线传播的基本定律 …… 37
五、光的偏振 …… 41
六、光的衍射 …… 44
七、棱镜 …… 44
八、光学玻璃 …… 51
第二节　薄透镜的成像 …… 57
一、透镜 …… 57
二、薄透镜及其成像 …… 58
三、透镜的折光本领与屈光度 …… 61
四、特殊的透镜 …… 62
第二章　摄影镜头成像的基本原理 …… 65
第一节　摄影镜头的成像 …… 65
一、共轴球面理想光学系统 …… 65
二、光学系统的焦点、节点与主点 …… 67
三、光学系统的成像作图与公式 …… 72
四、光学系统的组合 …… 85
五、玻璃滤光镜与分光棱镜对摄影镜头成像的影响 …… 92
第二节　节点、主点在摄影实践中的意义 …… 94
一、主点在摄影镜头设计与选购中的意义 …… 96

二、摄影镜头的倒装近摄 …… 97
三、转机的拍摄原理 …… 99
四、电影特技的“摇摄”与节点云台 …… 102
五、用变焦距摄影镜头模拟电影“推、拉镜头”效果 …… 105
六、背景放映合成特技 …… 105
第三章 摄影镜头的技术性能及对摄影的影响 …… 109
第一节 焦距与光学结构参数及视角 …… 109
一、设计焦距与标称焦距 …… 109
二、像面定位距、后顶焦距、前顶焦距、主点间距、节点间距、光学长度、镜头长度 …… 116
三、像场、像角与视角 …… 121
四、焦距与视角间的关系 …… 125
第二节 相对孔径与光圈数 …… 129
一、光阑与光圈 …… 129
二、相对孔径与像平面照度 …… 132
三、F数（f/数） …… 134
四、T数（T值） …… 144
第三节 调焦范围 …… 145
一、调焦与调焦距离 …… 145
二、调焦范围与红外线摄影的调焦 …… 149
三、调焦方式与焦深 …… 150
四、调焦补偿组元 …… 156
五、整组调焦时镜筒伸出量的计算 …… 158
第四节 像差与成像质量评价 …… 162
一、像差与像差曲线 …… 163
二、像差的校正 …… 179
三、分辨率与成像质量的评价 …… 183

四、星点检验与点列图 …… 203
五、调制传递函数与 MTF 曲线的评价 …… 206
第五节 镀膜与彩色贡献 …… 241
一、杂光的产因与危害 …… 241
二、单层镀膜与多层镀膜 …… 243
三、彩色贡献指数（CCI） …… 246
第六节 像场照度均匀率 …… 248
一、像场中心的照度 …… 248
二、像场边缘的照度与像场照度均匀率 …… 249
第七节 摄影镜头的机械结构 …… 252
一、摄影镜头与机身的联接 …… 252
二、镜片的固定与镜头的调节 …… 260
第四章 摄影镜头的种类与特点 …… 267
第一节 定焦距摄影镜头的种类与特点 …… 267
一、鱼眼摄影镜头（FISH-EYE） …… 267
二、短焦距摄影镜头（WIDE-ANGLE） …… 272
三、标准摄影镜头（STANDARD、NORMAL） …… 274
四、长焦距摄影镜头（TELEPHOTO） …… 275
第二节 变焦距摄影镜头（ZOOM）的种类与特点 …… 278
一、变焦距摄影镜头的原理与种类 …… 278
二、变焦距摄影镜头的特点 …… 285
第三节 特殊摄影镜头的种类与特点 …… 289
一、微距摄影镜头（Macro） …… 289
二、透视调整摄影镜头（PC、TS、Shift） …… 294
三、柔焦摄影镜头（Soft、Imagon） …… 300
四、短筒摄影镜头（Bellows） …… 302
五、自动调焦摄影镜头（AF、Autofocus） …… 302
六、医用摄影镜头（Medical） …… 305

七、显微摄影镜头（Micro） …… 306
八、内窥摄影镜头（Endoscopic Photography） …… 307
九、红外线（Infrared）与紫外线（Ultraviolet）
摄影专用摄影镜头 …… 309
十、夜视摄影镜头（Nightscope） …… 309
十一、闪光摄影镜头（CN AUTO） …… 312
十二、变形宽银幕电影摄影镜头（Anamorphic
Shooting） …… 313
十三、立体电影摄影镜头（Stereoscopic Photography） … 315
十四、组合摄影镜头 …… 318
十五、减震摄影镜头 …… 320
十六、变倍近摄摄影镜头 …… 325
十七、柔化衬景摄影镜头 STF …… 326
第五章 摄影镜头的光学结构类型与性能 …… 329
第一节 非对称型普通摄影镜头 …… 329
一、新月型摄影镜头 …… 329
二、三组四片式匹兹伐人像镜头（PETZVAL） …… 330
三、三组三片式柯克镜头（COOKE TRIPLET） …… 331
四、三组四片式天塞镜头（TESSAR） …… 331
五、三组五片式海里亚镜头（HELIOR） …… 332
六、三组六片式松纳镜头（SONNAR） …… 332
七、四组六片式贝奥冈镜头（BIOGON） …… 333
八、八组十二片式微距镜头 …… 334
第二节 对称型普通镜头 …… 335
一、二组四片式快直镜头 …… 336
二、二组六片式达格镜头（GOERZ DAGOR） …… 336
三、四组六片式双高斯镜头（DOUBLE GAUSS） …… 337
四、改进型双高斯镜头 …… 338

第三节 摄远型与反摄远型摄影镜头 …… 339
一、摄远型摄影镜头 …… 339
二、反摄远型摄影镜头 …… 342
第四节 普通超广角摄影镜头与鱼眼摄影镜头 …… 345
一、普通超广角摄影镜头 …… 345
二、鱼眼摄影镜头 …… 348
第五节 折反射型摄影镜头与变焦距摄影镜头 …… 349
一、折反射型摄影镜头 …… 349
二、变焦距摄影镜头 …… 351
第六章 摄影镜头的选购与维护 …… 357
第一节 摄影镜头的选购 …… 357
一、选购原则 …… 357
二、最佳选购方案 …… 361
第二节 摄影镜头的挑选与检验 …… 363
一、外观检验 …… 364
二、操作性能的检验 …… 367
三、成像性能的简易检验 …… 368
四、拍摄检验 …… 371
五、仪器检验 …… 374
第三节 摄影镜头的正确维护方法 …… 380
一、正确维护方法 …… 380
二、使用注意事项 …… 386
第四节 摄影镜头的发展趋势 …… 387
附录说明 …… 390
附录一 世界著名照相机用摄影镜头的种类与技术性能 …… 392
1. 国产凤凰摄影镜头 …… 392
2. 国产海鸥摄影镜头 …… 393
3. 德国卡尔·蔡司（CARL ZEISS）摄影镜头 …… 393

4. 德国罗敦司特（RODENSTOCK）摄影镜头 …… 396
5. 德国施耐德（SCHNEIDER）摄影镜头 …… 396
6. 法国昂热尼厄（ANGÉNIEUX）摄影镜头 …… 407
7. 日本骑士（HORSEMAN）照相机用摄影镜头 …… 407
8. 日本玛米亚照相机用塞柯（SEKOR）摄影镜头 …… 407
9. 日本勃朗尼卡照相机用吉野（ZENZANON）
摄影镜头 …… 409
10. 德国莱卡照相机用莱兹（LEITZ）摄影镜头 …… 413
11. 日本尼康照相机用尼柯（NIKKOR）摄影镜头 …… 413
12. 日本佳能照相机用佳能（CANON）摄影镜头 …… 413
13. 日本旭·潘太克斯照相机用潘太克斯
（PENTAX）摄影镜头 …… 425
14. 日本美能达照相机用美能达
（MINOLTA）摄影镜头 …… 425
15. 日本腾龙（TAMRON）摄影镜头 …… 435
16. 日本适马（SIGMA）摄影镜头 …… 435
17. 日本图丽（TOKINA）摄影镜头 …… 435
附录二 世界著名电影摄影镜头的种类与技术性能 …… 448
1. 甘肃光学仪器总厂甘光牌电影摄影镜头 …… 448
2. 长春市第二光学仪器厂凤凰牌电影摄影镜头 …… 448
3. 英国柯克（COOKE）电影摄影镜头 …… 450
4. 德国卡尔·蔡司（CARL·ZEISS）
电影摄影镜头 …… 450
5. 德国阿莱（ARRI）电影摄影镜头 …… 450
6. 法国昂热尼厄（ANGÉNIEUX）电影摄影镜头 …… 454
7. 日本佳能（CANON）电影摄影镜头 …… 454
8. 瑞士鲍莱克斯 16 毫米电影摄影机用斯威它
（SWITAR）摄影镜头 …… 459

9. 日本尼柯（NIKKOR）电影摄影镜头 …… 460
10. 日本柯瓦（KOWA）35毫米变形宽银幕
电影摄影镜头 …… 460
附录三　世界著名电视摄像镜头的种类与技术性能 …… 462
1. 德国施耐德（SCHNEIDER）电视摄像镜头 …… 462
2. 法国昂热尼厄（ANGÉNIEUX）电视摄像镜头 …… 462
3. 日本富士侬（FUJINON）电视摄像镜头 …… 462
4. 日本佳能（CANON）电视摄像镜头 …… 462
5. 日本尼柯（NIKKOR）电视摄像镜头 …… 463
附录四　国外摄影镜头、照相机外文名称与译名对照表 …… 478

绪论　摄影镜头的特点与发展史

摄影镜头的作用是成像。它是拍摄照片、电影、电视的重要器材之一。

在摄影界，往往将摄影镜头简称为**镜头**。

被摄景物投射来的成像光线进入摄影镜头后，摄影镜头可将其会聚到照相机或电影摄影机、电视摄像机的感光平面处，并结成该被摄景物的清晰影像，使位于该感光平面处的感光材料曝光。

位于照相机或电影摄影机感光平面处的感光胶片，在接受到清晰影像的光照后，立即产生光化学反应，并以潜影的形式将该影像记录下来（上述感光过程称为**曝光**），该感光胶片经过冲洗后，将以密度形式模拟下被摄景物的亮度与色度等信息。而位于电视摄像机、数字照相机感光平面处的 CCD 或摄像管等光电传感器的靶面处，在接受到清晰影像的光照后，立即产生光电变化，并以电信号的形式模拟下被摄景物的亮度与色度等信息。尔后数字照相机与数字摄像机尚需通模/数转换电路（A/D），将所获得的上述模拟信息转换为数字信息，以备存储与后期加工。

显然，摄影镜头可以在感光胶片与光电传感器上再现出被摄景物的轮廓、形态、尺寸大小之比，以及各物体、一物体各部位之间的横向、竖向空间位置关系和间距大小。

摄影镜头的成像原理是对人眼成像功能的模拟——摄影镜头既从视角、成像质量（影像的清晰度与色彩还原）等方面模拟人

眼的静态性能，又从调节通光量、调焦等方面模拟人眼的动态性能。

而摄影镜头通过感光胶片或光电传感器的成像过程，又是所摄影像对景物的**模拟**——所摄影像既从形态上模拟该被摄景物，又从相对位置关系上模拟该被摄景物。但是，由于是以二维空间的影像对三维空间之客观景物的模拟，故此原景物的立体感被平面化了。又由于受感光材料本身特性的影响，上述模拟的质量也将受到一定影响，例如受感光材料宽容度的限制，被摄景物的亮度范围无法全面真实再现（感光负片无法同时再现极亮与极暗景物的细部，且还将造成景物亮度间距的明显缩小），又如受感光材料的颗粒度与像素的限制，所摄影像细部质感的再现也将受到一定的影响。

当自然光（如阳光、天空散射光）或人工光（如灯光）的光线照射到被摄者身上时，被摄者除将其中一部分光线吸收外，还将其余部分按反射定律反射回周围空间。由于被摄者不同部位（如脸部、头发、上衣等）的物理结构不同，因而各部位所反射的光线多少、强弱和颜色也将不同。

若把反转胶片放置在前端装有一挡光屏的暗箱中，屏的中央开一个极小针孔，并使该针孔朝向被摄者，则对于该极小针孔，根据光线的直线传播定律可知，被摄者身上某点所投射出的全部光线中，只有极小一束光线能穿过针孔，投射到感光胶片上，使胶片曝光，由此该胶片上可形成被摄者暗淡的（故此所需曝光时间较长）、且清晰度不高的影像。如图 0—1 中所示。

若把反转胶片放置在前端装有一凸透镜的暗箱中，并使该凸透镜朝向被摄者，则被摄者身上某点所投射出的全部光线中，将会有很大一束光线被凸透镜会聚于感光胶片上，使胶片曝光。由于凸透镜的会聚作用，所以使胶片上所形成的被摄者影像比针孔成像明亮。又由于单片凸透镜存在很多像差，因而所成影像的清

晰度虽比针孔成像有所改善，但仍极不理想。如图 0—2 中所示。

若把反转胶片放置在前端装有一摄影镜头的暗箱中，并使摄影镜头朝向被摄者，则被摄者身上某点同样会有一束光线被摄影镜头会聚于感光胶片上，使胶片曝光。由于摄影镜头的会聚作用，以及该镜头校正了绝大部分像差，因而使感光胶片上所形成的影像不但比较明亮（若摄影镜头与单片凸透镜的相对孔径相同，则因镜头片数较多，故光线透过镜头后的损失要略大），而且清晰度很高。如图 0—3 中所示。

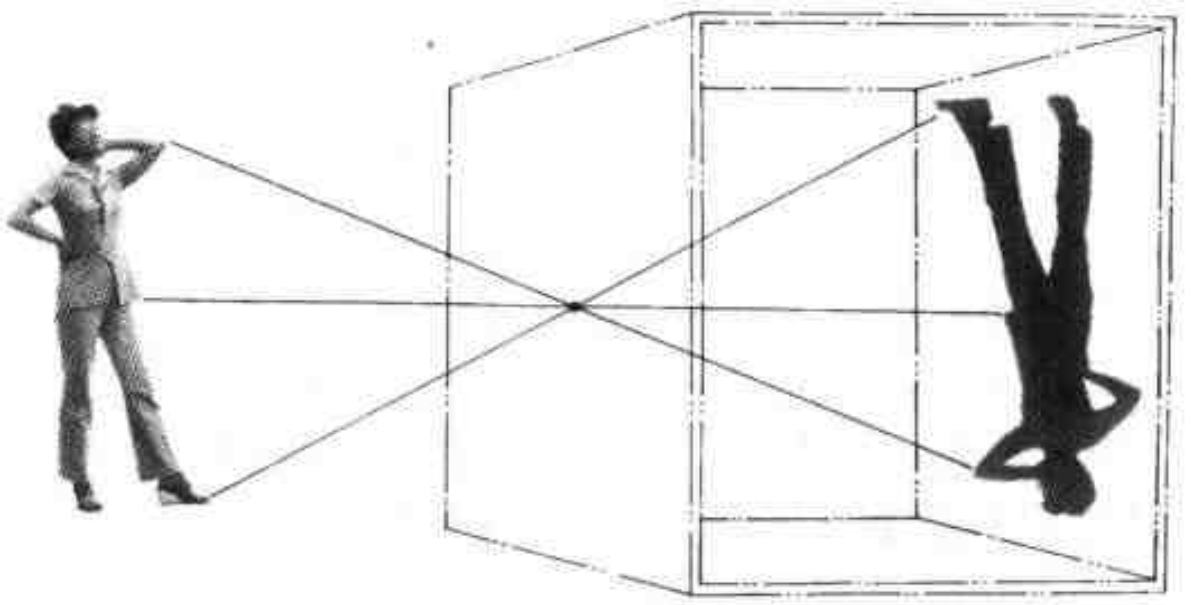


图 0—1　针孔成像

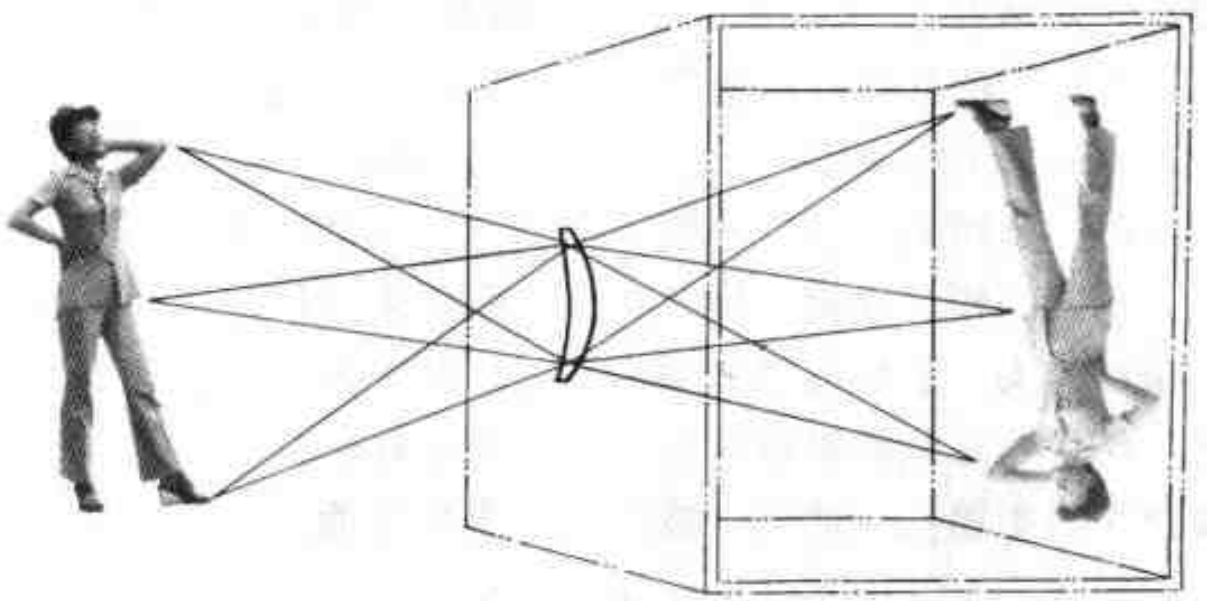


图 0—2　凸透镜成像

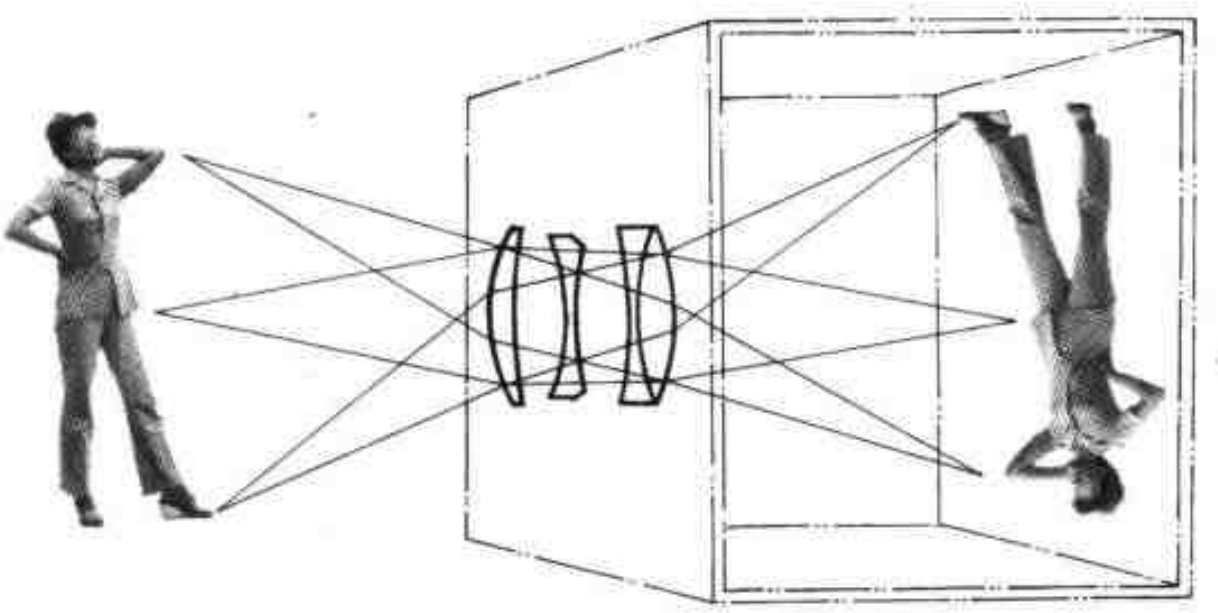


图 0—3　摄影镜头成像

摄影镜头的种类繁多，常见分类方法有下列几种：

1. 按所用胶片规格和所能拍摄出的最佳画幅规格进行分类（其本质是按摄影镜头的清晰像场分类）。例如，可分为：大型、中型（即 120 型）、127 型、135 型、126 型、110 型等照相镜头，35 毫米电影、超 16 毫米电影、16 毫米电影、超 8 毫米电影摄影镜头，1 $\frac{1}{4}$英寸、1 英寸、2/3 英寸、1/2 英寸、1/3 英寸电视摄像镜头。参见表 0—1 所示。不同画幅规格的摄影设备，其标准焦距摄影镜头的具体焦距值将不同。

2. 按摄影镜头的焦距进行分类。例如，焦距由短至长可分为：鱼眼摄影镜头、超广角摄影镜头、广角摄影镜头、标准摄影镜头（不同画幅尺寸照相机之标准摄影镜头的焦距值亦不相同）、摄远摄影镜头、超摄远摄影镜头六类。其中焦距小于标准摄影镜头者，统称为短焦距摄影镜头，焦距大于标准摄影镜头者，统称为长焦距摄影镜头。此外，按摄影镜头焦距能否改变，又可分为定焦距摄影镜头和变焦距摄影镜头两类。

3. 按摄影镜头的光学结构类型进行分类。例如，按有无反

光镜可分为折射式摄影镜头（即普通摄影镜头）和折反射式摄影镜头；按光学结构型式又可分为柯克三片型、天塞型、双高斯型等很多种摄影镜头。

4. 按摄影镜头的用途进行分类。例如，可分为普通摄影镜头，特殊摄影镜头（如微距摄影镜头、透视调整摄影镜头等）。

摄影镜头一般由光学系统与机械装置两部分组成，如图 0—4 中所示。

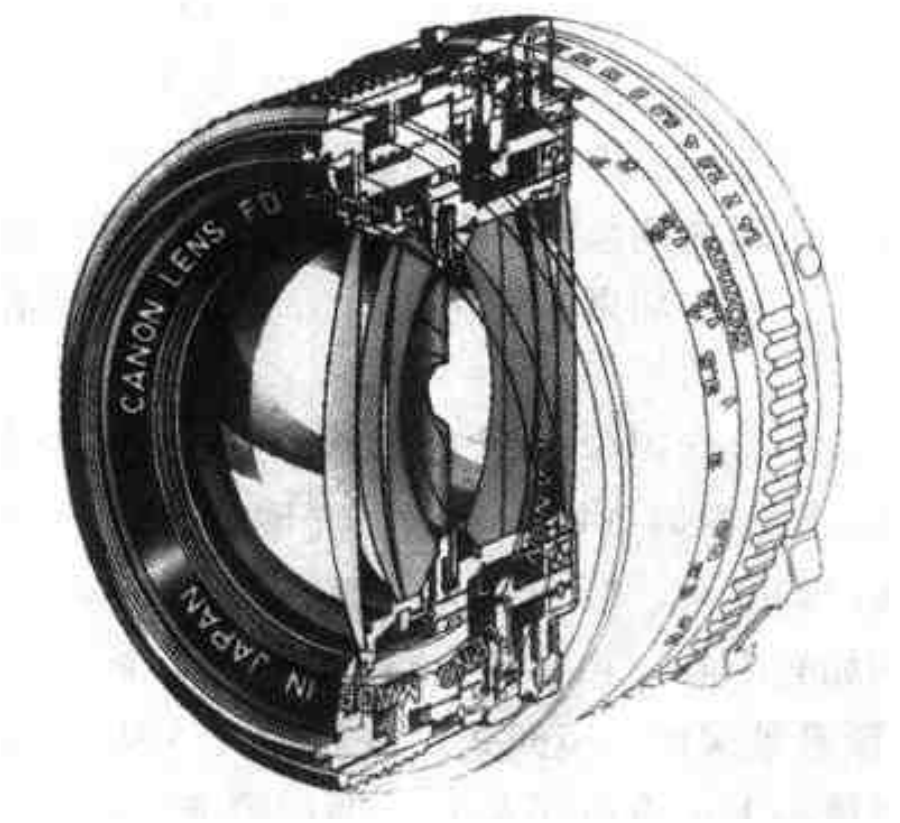


图 0—4　摄影镜头剖视图

其中光学系统主要包括若干单片透镜与胶合透镜，甚至球面反光镜等光学元件。现代摄影镜头在这些光学元件与空气相接触的表面上，一般镀有增透膜。

光学公司在介绍自己所产摄影镜头的光学结构特点时，经常使用几“组”几“片”的术语。此处的“片”指透镜片，“几片”指该摄影镜头共由几片透镜片组成。“组”指前后两侧均为空气而中间无空气夹层的一个整体光学单元，显然“一组”可能为一片独立的透镜片，也可能为由两片或三片、甚至更多片透镜彼此

胶合在一起所构成的整体单元；“几组”指摄影镜头共由多少组独立的整体光学单元组成。所含组数与片数较多的摄影镜头，其成本一般相对较高，成像质量一般也相对较好。在摄影镜头的英文资料中，一般用 G（Group）表示组数，E（Element）表示片数。例如，图 0—4 中所示摄影镜头为 6 组 7 片式的光学结构。

光学公司在介绍摄影镜头的光学结构特点时，还经常按透镜在成像过程中所起的具体作用性质，将组成该摄影镜头的全部透镜划分为几大部分——“群”。其中“一群”可能仅含一组透镜，也可能包含若干组透镜。例如，变焦距摄影镜头常包含有：起成像作用的固定群，起变焦作用的变焦群，起补偿像面漂移作用的补偿群，起调焦作用的调焦群，甚至起校正近距离调焦之像差作用的调焦补偿群、起增加摄影镜头焦距倍率作用的增倍群等几大部分。

机械装置主要包括固定光学元件的零件（例如镜筒、压圈、联接环等零件），镜头调节机构（例如光圈调节环、调焦环、变焦环、镜间快门调节环、胶片感光度调节环等机构），决定曝光量的机构（例如光圈叶片和自缩光圈机构，快门叶片和镜间快门机构），以及预看景深钮、镜间式机械自拍机、闪光联动机构等。

有的摄影镜头上还有电子装置，例如测光元件、测距元件、自动调焦控制元件和调焦电动机、自动变焦电动机、光圈数值传感元件、电磁光圈等。

摄影者对摄影镜头性能上的要求，主要可归纳为“像、清、亮、匀、准、适、小”七个字。

像：指摄影镜头所摄影像不失真，影像与被摄物体非常象，色彩还原好。

清：指摄影镜头所摄影像的清晰度高、层次丰富、影调细腻。

亮：指摄影镜头的最大相对孔径大，透光能力强，从而能使

表 0—1　　按画幅尺寸分类的摄影镜头

摄影镜头类型		胶片宽度	可拍摄的画幅尺寸
照相用	大型摄影镜头	散页片	8″ × 10″（18cm × 24cm）
	大型摄影镜头	散页片	5″ × 7″（13cm × 18cm）
	大型摄影镜头	散页片	4″ × 5″（9cm × 12cm）
	大型摄影镜头	61mm	6cm × 17cm（120 胶卷可拍 4 幅）
	大型摄影镜头	61mm	6cm × 12cm（120 胶卷可拍 6 幅）
	中型摄影镜头	61mm	56mm × 82mm（俗称 6cm × 9cm、120 胶卷可拍 8 幅）
	中型摄影镜头	61mm	56mm × 67mm（俗称 6cm × 7cm、120 胶卷可拍 10 幅）
	中型摄影镜头	61mm	56mm × 56mm（俗称 6cm × 6cm、120 胶卷可拍 12 幅）
	中型摄影镜头	61mm	56mm × 41.5mm（俗称 6cm × 4.5cm、120 胶卷可拍 16 幅）
	127 型摄影镜头	45mm	4cm × 4cm
	135 型全幅摄影镜头	35mm	24mm × 36mm（135 胶卷可拍 36 幅）
	135 型半幅摄影镜头	35mm	24mm × 18mm（135 胶卷可拍 72 幅）
	126 型摄影镜头	$1\frac{1}{8}''$	26mm × 26mm（俗称 $1\frac{1}{8}''$ × $1\frac{1}{8}''$、126 胶卷可拍 20 幅）
	110 型摄影镜头	16mm	13mm × 17mm（110 胶卷可拍 20 幅）
	米诺克斯摄影镜头	9.5mm	8mm × 11mm（每卷胶卷可拍 50 幅）
	打火机式摄影镜头	8mm	6mm × 6mm（每卷胶卷可拍 20 幅）
	圆盘照相机摄影镜头		8mm × 10mm（每盘可拍 15 幅）

续表

摄影镜头类型		胶片宽度	可拍摄的画幅尺寸
电影摄影用	35毫米电影摄影镜头	35mm	21.95mm × 16mm（对角线为27.16mm）
	16毫米电影摄影镜头	16mm	10.05mm × 7.42mm（对角线为12.49mm）
	超16毫米电影摄影镜头	16mm	12.3mm × 7.5mm（对角线为14.4mm）
电视摄像用	$1\frac{1}{4}$英寸摄像机用镜头		17.1mm × 12.85mm（对角线为21.4mm）
	1英寸摄像机用镜头		12.8mm × 9.6mm（对角线为16mm）
	2/3英寸摄像机用镜头		8.8mm×6.6mm（对角线为11mm）（16:9画幅为9.59mm×5.39mm）
	1/2英寸摄像机用镜头		6.4mm×4.8mm（对角线为8mm）
	1/3英寸摄像机用镜头		4.8mm×3.6mm（对角线为6mm）

所结成的影像比较亮，有利于在低照度条件下进行正常摄影。

匀：指摄影镜头的像场照度比较均匀，即画幅中心与四周的照度相差不大。

准：指摄影镜头上各标尺刻度（如光圈数标尺、调焦标尺）的刻线位置准确、精度高，无空回间隙（即调节环先后沿顺时针方向与逆时针方向调至同一刻度处时的调节精度应精确一致）。

适：指摄影镜头上各调节环的操作阻尼力应大小合适、稳定，既无死点、涩点，又不过分灵活，更无松动、晃动（尤其是供翻拍用的微距 Macro 摄影镜头，一旦调焦环的阻尼力太小时，照相机反光镜升起时的轻微震动都将引起调焦状态的改变而使影像变虚）。

小：指摄影镜头的体积小、便于携带。

我国是文明古国，对光与影像的研究历史悠久。

早在公元前400年前，我国古代学者墨子先生与其弟子所著的《墨经》一书中，即已经阐述了光的直线传播、光的反射，平面镜、凹面镜、凸面镜的成像现象，以及针孔成像现象。

近年出土的公元一世纪的汉代古墓中，发现了天然水晶磨制成的透镜。这一事实更雄辩地证明了我国古代人民当时对光学成像所取得的卓越成就。

在900年前的宋代，著名学者沈括（1031年至1095年）先生在其所著《梦溪笔谈》一书中，详细阐述了“小孔成像匣”——针孔成像的原理。

在欧洲，直至公元前300年前欧几里德才发现了光的直线传播和针孔成像现象。

在十三至十四世纪，欧洲出现了供近视眼与远视眼患者配带的凹透镜与凸透镜。

在十六世纪文艺复兴时期，欧洲出现了供绘画时成像用的大型暗箱，1620年奥地利的开普勒设计了可携式绘画暗箱。

1812年，英国的物理学家乌拉斯顿（W.H.Wollaston）发明了新月型摄影镜头。该摄影镜头为摄影镜头发展史上的第一个摄影镜头。它由位于前方的光圈与一片凹面朝前的新月型凸透镜（为凹凸透镜）所共同组成。当初的新月型摄影镜头的最大相对孔径较小，仅1:16（如图0—5中所示）。乌拉斯顿把该摄影镜头装在可携式木制暗箱前端，并在暗箱后方安装了一片磨砂玻璃，以供成像。新月型摄影镜头当初又称为风景透镜。

1821年，薛瓦利埃（Chevalier）发明了一组二片式消色差摄影镜头。该摄影镜头是由凹、凸两片透镜胶合成的透镜组，与位于前方的光圈所共同组成。最大相对孔径为1:12（如图0—6所

示)。1839年诞生的世界上第一台照相机——达盖尔(L·Daguerre)可携式伸缩木箱照相机即采用了这种镜头。一组二片式消色差镜头中的两透镜材料不同,其折射率也不相同,因而能校正部分色差,成像质量比新月式摄影镜头有所提高,但仍属原始镜头之列。

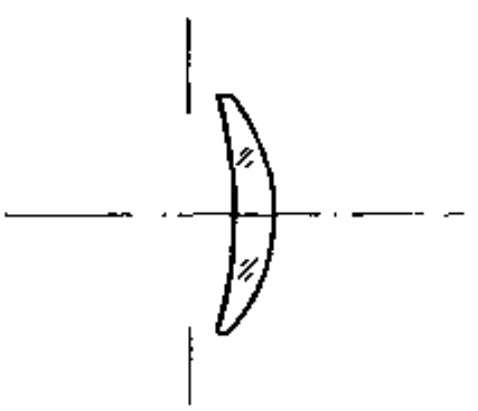


图0—5 新月型透镜

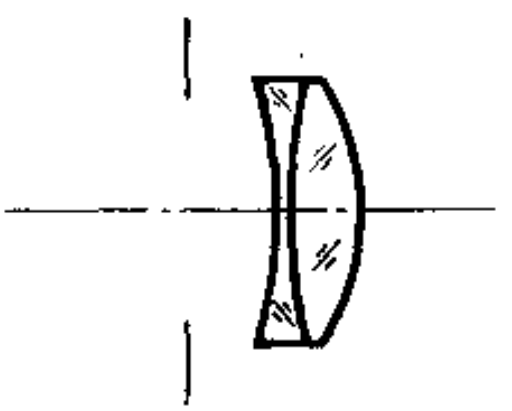


图0—6 消色差镜头

1839年,达盖尔银版照相术的发明及推广,极大地促进了摄影镜头的迅速发展。

1840年,匈牙利数学家J.M.匹兹伐(J.M.Petzval)先生在世界上第一个用数学计算方式设计出一只新型摄影镜头——匹兹伐摄影镜头。该摄影镜头为三组四片式结构,第一组为由一凸一凹两个透镜彼此胶合而成的正透镜组,第二组为一片凹透镜,第三组为一片凸透镜,光圈位于第一、二组之间。此镜头的第二与第三组透镜构成了正光焦度的效果。最大相对孔径为1:3.7(如图0—7所示)。

1893年,英国泰勒·哈勒森公司的泰勒(H.D.Taylor)设计出三组三片式柯克(COOKE TRIPLET)摄影镜头。该摄影镜头前、后二片均为凸透镜,且均用钡冕玻璃制成,中间一片为凹透镜,由火石玻璃制成,光圈位于第一、二片透镜之间。如图0—8所示。三组三片式柯克摄影镜头系当时能够对全部六种像差进行校正的结构最简单的摄影镜头,故此曾为世界各光学公司纷纷

仿制。

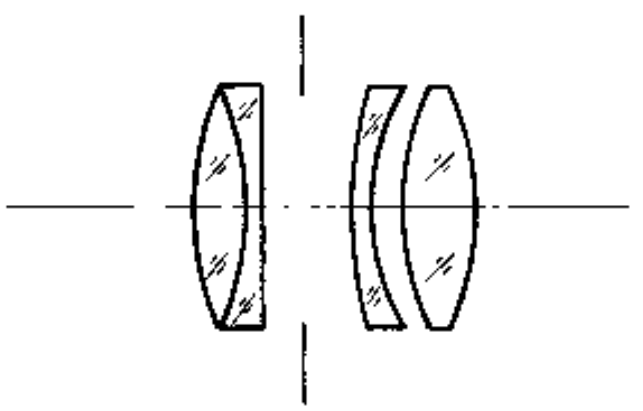


图 0—7　匹兹伐镜头

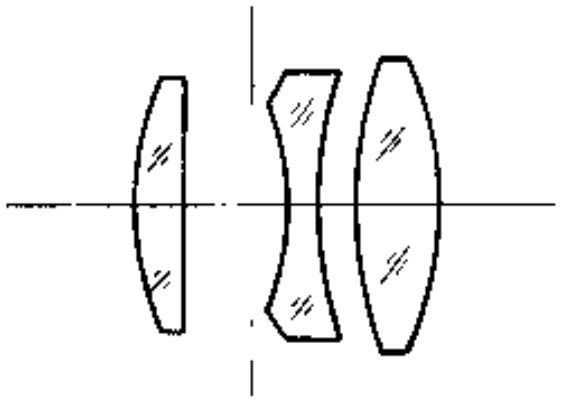


图 0—8　三片式柯克镜头

1895 年，电影的诞生与逐步普及，对摄影镜头的成像质量提出了更为严格的要求，也进一步促进了摄影镜头的发展。

1896 年，德国卡尔·蔡司（Carl·Zeiss）光学公司的鲁道夫（P.Rudolph）设计出四组六片式双高斯摄影镜头，并命名为普兰纳型（PLANAR）（如图 0—9 所示）。该摄影镜头虽然结构比较复杂，成本较高，但其采取的对称型结构使该镜头具有了很好的成像质量，以及很大的相对孔径和中等的视场。故此，该摄影镜头诞生后引起世界各光学公司的竞相仿制，并导致一系列改进型双高斯摄影镜头的问世。双高斯摄影镜头及其改进型的优良成像性能，使其至今仍为各光学公司在设计标准摄影镜头时广泛采用。

1902 年，鲁道夫还设计出三组四片式天塞（TESSAR）摄影镜头（如图 0—10 所示）。从光学结构看，天塞摄影镜头与三片式柯克改进型摄影镜头很相似，但第三组镜片有所差异——改为凹透镜与凸透镜胶合成的透镜组。也正因为引入了胶合透镜，因而使成像质量比三片式柯克摄影镜头有了很大改善，且使视场角也略为增大。天塞摄影镜头较好的成像质量，以及简单的结构和偏低的成本，被世界各国光学公司广为仿制。

至二十世纪的二十年代，摄影镜头领域始终为定焦距镜头的一统天下。

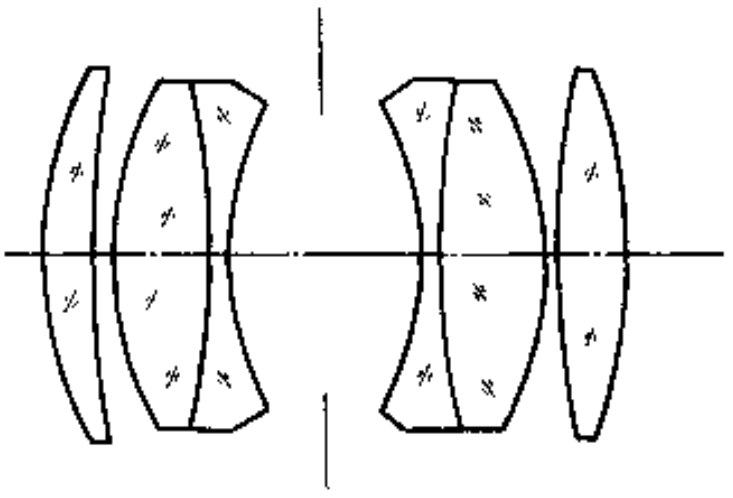


图 0—9 双高斯镜头

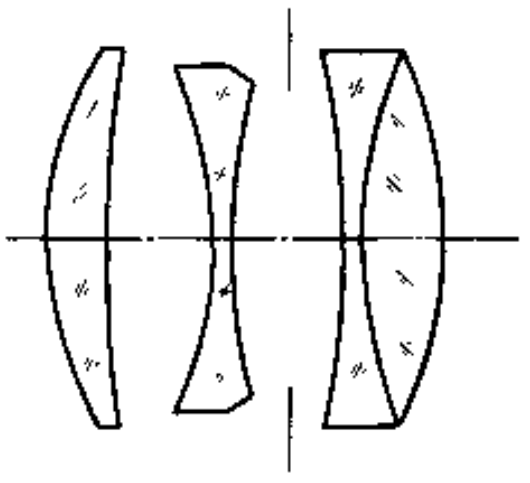


图 0—10 天塞镜头

三十年代初期，焦距可以改变的变焦距摄影镜头问世。当初曾用于某些对剧情有特殊要求，需较快改变拍摄范围大小，相应较快改变被摄主体影像大小的电影画面中。但这类早期变焦距摄影镜头所成影像质量远低于定焦镜头所成影像质量，因而在电影拍摄中应用极少。然而变焦镜头可灵活改变所成影像尺寸的特点，却使其于三十年代在电影放映中得到广泛应用——变焦放映镜头可在同一放映距离处，使不同片型的影片画面充满同一尺寸的银幕；也可在不同放映距离处，使同一片型影片的画面充满同一尺寸的银幕。

在电视实况转播中由于不允许为了更换不同焦距的摄像机镜头而导致播送中断，反之在摄取体育竞赛等影像时又需要反复改变摄影镜头的焦距，以获得所需景别（远景、中景、近景、特写等）的画面和进行连续跟踪，此外，电视对摄影镜头分辨率的要求远较电影低（早期电视约为 8 线对/毫米），且电视外景拍摄一般所需光圈较小、焦距较长，因此，这类变焦距摄影镜头相对较易设计。于是，随着电视的诞生和推广，1946 年左右，电视摄像机开始大量应用变焦距摄影镜头。

鉴于 8mm 电影和 16mm 电影所摄画幅尺寸较小，一般又多为

非专业摄影用，既对摄影镜头成像质量要求较低，又要求售价便宜，因而结构较简单的变焦距摄影镜头，率先于五十年代开始大量应用于 8mm 和 16mm 电影摄影机。1956 年，8mm 电影摄影机厂家首先开始用一只变焦距摄影镜头取代原先配套供应的一组定焦距摄影镜头。

1958 年德国福伦达（Voigtläder）公司生产出世界上第一只照相机用变焦距摄影镜头——Voigtläder Zoomar 36－82 毫米、F2.8 变焦距摄影镜头，该镜头采用 11 组 14 片式的光学结构。

五十年代末，随着科学技术的进步，光学设计和制造领域有了长足发展，诞生了焦距较短、相对孔径较大的变焦距摄影镜头，因而进一步设计和制造了难度较大的演播室用电视变焦距摄影镜头。

五十年代末至六十年代初，35mm 电影用变焦距摄影镜头陆续研制成功。其成像质量接近电视演播室用变焦距摄影镜头。1962 年，出现了变焦距比为 10 倍的电影用变焦距摄影镜头和电动变焦装置。同年，电视摄像机厂家开始用一只变焦距摄影镜头取代原先配套供应的一组定焦距摄影镜头。

1970 年，英国兰克·泰勒·哈勃森公司（RANK TAYLOR HOBSON）生产出柯克（COOKE）牌、焦距为 20～100mm、光圈为 F2.8～F22（T3.1～T22）、供 35mm 电影摄影用的 5 倍变焦距摄影镜头。该摄影镜头采用 14 组 21 片式光学结构（参见图 0—11 所示），镜头总长（自像面开始）为 370mm，最大直径（前端）为 145mm，重量达 4 公斤。此镜头的出现使变焦距摄影镜头的成像质量向上迈进了一个台阶——已接近定焦距摄影镜头的成像质量。此后，有一批电影摄影师开始用此 5 倍变焦距摄影镜头取代部分定焦距摄影镜头进行 35mm 电影拍摄。

我国北京 608 厂于 1976 年研制出 35mm 电影用、焦距 20～100mm、1:2.8 的 5 倍变焦距摄影镜头；1979 年研制出 35mm 电

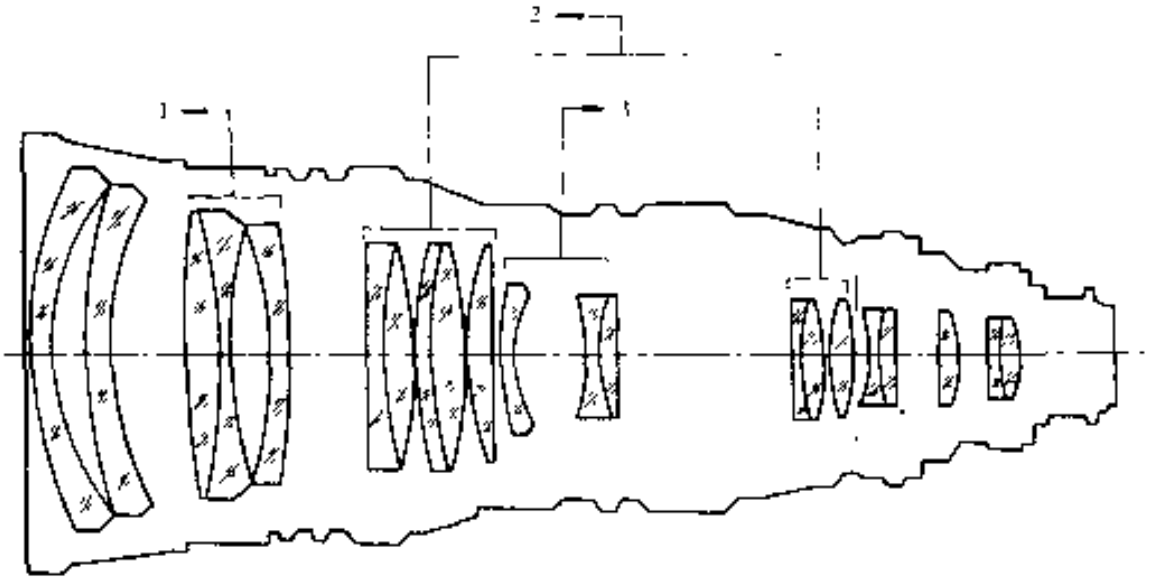


图 0—11 柯克 20～100mm 5 倍变焦距镜头

影用、焦距 18～180mm、1:3.2 的 10 倍变焦距摄影镜头。长春第二光学仪器厂生产出 35mm 电影用、焦距 25～750mm、1:3.2 的 30 倍变焦距摄影镜头。北京 608 厂于 1983 年生产出 35mm 电影用大孔径系列定焦距摄影镜头，计有 20mm、1:1.4，28mm、1:1.4，35mm、1:1.28，50mm、1:1.3，85mm、1:1.4 等 5 种摄影镜头。

纵观摄影镜头的发展史可知，光学技术——光学材料、制造工艺技术和设计方面等的发展和进步，是摄影镜头进步的动力。

首先，新型光学材料的不断发明与应用，为光学设计者提供了愈来愈多的选择余地，从而诞生了一系列划时代的摄影镜头产品。

其中，1886 年光学家阿贝（E.Abbe）和肖特（O.Schott）二人在德国卡尔·蔡司（CARLZEISS）公司，发明了钡冕光学玻璃，从而为世界摄影镜头的设计和制造揭开了新的一页，并产生了能对色差和像散进行校正的正光摄影镜头。

六十年代镧玻璃、钛玻璃、镉玻璃等的推广，诞生了一系列优良的摄影镜头。

七十年代，人工萤石和一系列低色散光学玻璃的研制成功与

推广，使长焦距摄影镜头的成像质量有了大幅度的提高。

其次，光学制造工艺技术的完善与加工精度的提高，使光学设计得到了更好的实现，从而使摄影镜头的成像质量明显提高。

早在 1892 年，英国光学家杜勒先生首先发现，一个透镜表面已失去光泽、颜色晦暗的陈旧摄影镜头，因反光损失少，故反而比透镜表面光洁的全新摄影镜头具有更强的透光能力。

此后，光学家们发现镀膜可减少透镜表面反光，并对镀膜加工工艺进行了一系列探索，以求减少摄影镜头成像过程中的杂光，显著提高摄影镜头所成影像的反差、清晰度和色彩饱和度。

1936 年约翰史特朗发明了用氟化物蒸发、并沉积在透镜表面、进行单层镀膜加工的工艺，使镀膜技术进入实用阶段。只是早期镀膜的附着牢度较低，很易于在擦拭镜片时脱落。

随着不断研究，单层镀膜工艺不断完善，镀膜质量不断提高，镀膜牢度也明显增强了。

进入七十年代，对多层镀膜机理的研究，导致了多层镀膜的推广。各光学公司的多层镀膜工艺更是百花齐放：有普通真空多层镀膜工艺，有电子束多层镀膜工艺（EBC，如日本富士公司），有超级分光式多层镀膜工艺（Super Spetcrum Coat，如日本佳能公司）……

目前，多层镀膜工艺已可在透镜表面镀上十几层不同的增透膜层。

多层镀膜不但极大地减少了摄影镜头的杂光，显著提高了所成影像质量，而且通过合理的膜层选择，还可显著改善摄影镜头的彩色贡献指数 CCI（Color Contribute Index），使摄影镜头具有良好的彩色平衡，忠实地再现被摄景物的色彩和色调，有优良的彩色还原性能。

光学冷加工技术的提高，不但明显提高了透镜的尺寸精度和生产率，而且极大地提高了摄影镜头机械零件的尺寸精度（如变

焦距摄影镜头之镜筒上的曲线槽加工尺寸精度）和装配精度，从而显著提高了摄影镜头的成像质量。

现代非球面透镜加工工艺的日臻完善，诞生了一批在球差和畸变像差校正上性能优良的高质量新型摄影镜头。

自六十年代以来大型电子计算机与数字最优化方法在光学设计中的大量应用，光学设计理论的推陈出新，以及一系列新颖光学设计程序的发明，更使光学设计者如虎添翼。此后，大孔径、高像质、焦距各异的定焦距摄影镜头，以及大孔径、高像质、大变倍比的变焦距摄影镜头不断涌现。

1961 年日本佳能公司生产出了最大相对孔径达 1∶0.95、焦距 50mm 的大孔径照相摄影镜头。美国潘那维申公司生产出了供 35mm 电影摄影用的焦距 10mm T1.9 的消畸变超广角摄影镜头。

六十年代，光学传递函数（OTF）理论在摄影光学界得到推广，调制传递函数（MTF）进入了摄影镜头成像质量评价领域。

以往评价摄影镜头成像质量优劣，通常采用分辨率检测方法。可是摄影者经常会发现，某摄影镜头虽然分辨率很高，但拍摄普通景物时，所摄影像却显得不够清晰、轮廓不够鲜明、影调略灰暗、质感略差，而另一摄影镜头虽然分辨率并不很高，但拍摄普通景物时，所摄影像却显得比较清晰、轮廓鲜明、影调明朗、质感强。总之，分辨率检测方法虽然简便易行，可进行定量比较，但有时摄影镜头分辨率的高低与所摄影像视觉效果的好坏存在矛盾和差异。

而调制传递函数可以把摄影镜头成像质量的评价结果与该镜头的实际拍摄效果有机地统一起来，因而是分析与研究影像信息传递过程中失真大小的最佳方法，是目前光学领域中评价摄影镜头成像质量优劣的最完善、最全面、最客观的方法。

八十年代，有限离焦分辨率已愈来愈多引起光学界关注。因为有限离焦分辨率的提高，不仅可显著改善调焦有误差时的影像

质量，而且可明显提高前景和背景的影像清晰度，从而使摄影镜头更适应具体拍摄条件，以减弱摄影者调焦误差对影像质量的不良影响。

在短焦距摄影镜头设计中引入的调焦补偿光学组元，可视摄影镜头具体调焦距离的远近不同，相应改变其在摄影光路中的位置，从而可在近摄时明显降低摄影镜头的场曲等像差，显著提高近摄时的影像清晰度（参见第三章第三节四中有关内容）。

在长焦摄影镜头设计中采用内调焦（IF）结构，由凸轮机构取代大而笨的多头螺纹伸缩机构，即由部分光学元件的轴向位移取代整个光学系统的前后伸缩，可使摄影镜头体积小巧，只需使调焦环略转动一个小角度，就可完成较大范围内的调焦操作。镜头调焦迅速，且调焦时镜头的总长度不会改变，摄影镜头的最大相对孔径也较大。

随着摄影者需要的不断扩展，摄影镜头的种类相应日益增多。例如，早期只有一种标准焦距摄影镜头，随着摄影者摄影造型的不同需要，诞生了广角摄影镜头和摄远摄影镜头，尔后又诞生了超广角摄影镜头和超摄远摄影镜头。

又如，伴随着 35mm 变形宽银幕电影的出现，诞生了 35mm 变形宽银幕电影用定焦距摄影镜头，以及供电影变焦距摄影镜头使用的变形镜。

再如，随着立体电影由双机拍摄发展到单机拍摄，诞生了立体电影摄影镜头。

还有，为满足近距离摄影的需要，诞生了微距摄影镜头；为了能够在漆黑的夜间进行摄影，诞生了夜视摄影镜头；为了能够拍摄物体内部的影像，诞生了内窥摄影镜头；为了延长摄影镜头的焦距，扩展其造型功能，诞生了倍率镜……

摄影镜头自动化程度的提高，简化了摄影者的操作，深受新闻摄影者和业余摄影者的喜爱，各类自动化摄影镜头近年不断问

世：首先，伴随照相机、电影摄影机、电视摄像机自动测光机构的诞生，出现了自动调节光圈大小的摄影镜头；其次，伴随变焦距摄影镜头在电影、电视上的广泛采用，出现了可通过开关控制的电动变焦摄影镜头；八十年代，伴随着自动光电测距装置等的诞生，又出现了自动调焦摄影镜头。

虽然摄影镜头的品质优劣直接影响着所摄影像的清晰度高低，但摄影者不要忽略摄影基本功的掌握与训练，因为再好的摄影镜头如果拍摄时调焦不准、手持照相机拍摄时握持的不稳、所选之快门时间未足够短（在手持摄影时一般建议所选快门时间的分母应大于或等于所用摄影镜头的具体焦距数值）等等，均将导致所摄影像清晰度的下降，且该缺陷在后期制作时很难弥补。

此外，摄影者在摄影艺术创作中，请千万不要轻视了自己的主观能动性，不要掉入“唯武器论”的怪圈之中。持有昂贵的高档专业摄影镜头，而没有一定的艺术素质、不掌握过得硬的摄影技艺，未经过摄影基本功的刻苦训练，缺乏刻苦的奋斗精神，是很难获得优秀摄影作品的。何况对于供报纸上发表的摄影作品而言，由于受印刷工艺的限制，高档摄影镜头所拍摄出的极高清晰度根本无法在报纸上体现出来，其在报纸上的画面效果与用普及型摄影镜头所摄效果并无明显区别。

对于业余摄影者而言，中档摄影镜头已足以应付自己的日常摄影创作了，若非具有雄厚的经济实力，完全没有必要非追求购买昂贵的高档专业级摄影镜头不可。君不见目前国产凤凰牌、海鸥牌摄影镜头，比之三四十年代摄影大师们所用的摄影镜头要优秀得多了。更何况与普通摄影镜头相比，高档专业摄影镜头在性能上提高的倍率远远不如其在价格上提高的倍率为大。

笔者认为，对摄影者而言，优秀摄影作品诞生必须具备的三大条件是：才能、勤奋与机遇。笔者祝愿所有热爱摄影的人们，

不断提高自己的摄影技艺与综合人文素质，勤奋努力，及时把握住机遇，拍摄下更多、更激动人心的最佳、最美瞬间。

亲爱的摄影朋友们，让我们用满腔热情来热爱人类、热爱生活、热爱大自然，奋力歌颂我们伟大的祖国、伟大的民族，歌颂人间的真情，歌颂真、善、美吧！

思　考　题

1. 摄影镜头的特点如何？
2. 按不同分类方法分别阐述常见摄影镜头的种类有哪些？
3. 优良摄影镜头的标准是什么？
4. 简述摄影镜头的发展简史？

第一章 光学基础知识

第一节 光 的 特 性

光与人类的日常生产、生活紧密相关，人们的眼睛也只是在光的作用下才获得了视觉，才观察到了周围的世界。摄影术更是依赖于光才得以诞生与发展的。

一、光 与 色

光是一种物质，它同时具有波和微粒（量子）的双重性质，即光具有波粒二象性。

根据光的波动理论，光是电磁波的一种。可见光的波长范围约为 380～780nm（毫微米）①，超出这个范围人眼就看不见了。参见图 1—1 所示。光在空气中的传播速度约为每秒 30 万公里（光在真空中的精确速度 1957 年确定为 299792.5 ± 0.4km/s，在空气中的精确速度比真空中慢 67km/s），光在水中的速度约为空气中的3/4，光在玻璃中的速度比在水中还要慢些。

光从一种均匀介质进入另一种均匀介质的传播过程中，光传播速度较高的那一介质称为光疏介质；而较低的另一介质称为光密介质。光疏与光密介质是相对的。如水与空气相比，水是光密

① 也有人认为是 400～760nm。这是因为被实验的对象不同，故统计结果很难绝对相同。

介质；而水与玻璃相比，水又是光疏介质。

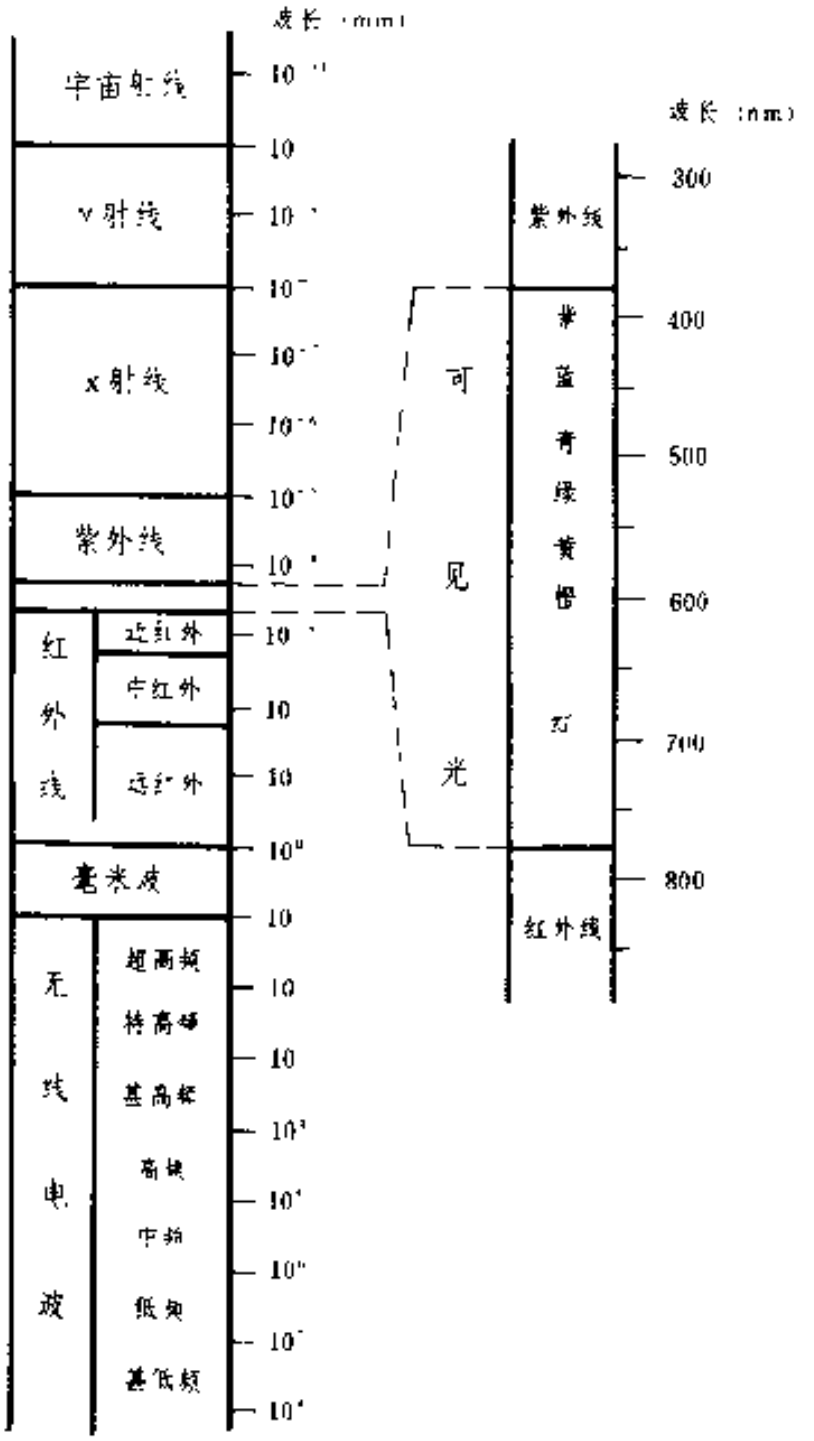


图 1—1　各种电磁波的波长分布

不同波长的可见光，可使人眼睛产生不同的颜色感觉——当可见光的波长先后由长至短变化时，眼睛将依次产生红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等色彩感觉。参见表 1—1 所示。

国际照明委员会（CIE）于 1931 年公布，作为三色系统（即 1931CIE-RGB 系统）基础的三原色的单色辐射光波，其波长分别

如下：红色光为700nm，绿色光为546.1nm，蓝色光为435.8nm。

表 1—1　　光波波长与颜色

颜色	波长范围（nm）	颜色	波长范围（nm）
紫	380～430	黄绿	550～570
靛蓝	430～450	黄	570～590
蓝	450～485	橙	590～620
青	485～495	红	620～650
绿	495～550	深红	650～780

物质的颜色系由该物质本身的结构特性和光的特性所决定的。

透明物体的颜色系由该物体所能透过的光的波长范围所决定的。例如，若某透明物体只允许可见光中的红光光波通过（即该物体吸收了除红光外的其它色光），则该物体在白光下就呈现为红色（参见作者所著《摄影滤光镜的性能与使用》一书书末彩色附图3所示）；若某透明物体只允许绿光通过，则该物体在白光下就呈现为绿色，余类推。若某透明物体可让全部可见光皆均匀通过，则该物体为无色透明体。若某物体在让可见光通过的同时，使各波长均受到相同程度的减弱（即该物体能对可见光进行一定程度的非选择性吸收），则该物体为灰色半透明体。又如，同一蓝色透明体，在白光下呈现为蓝色，而在红光或绿光下则几乎呈现为黑色；同一无色透明体，在白光下呈现为无色透明状，而在红光或绿光、蓝光下，则分别呈现为红色、绿色、蓝色；余类推。

不透明物体所呈现出的颜色、系由该物体所能反射回的光的波长范围与光源的光谱组成所共同决定的。若某不透明物体只反射可见光中的红光光波（即该物体吸收了除红光外的其它色光），则该物体在白光下就呈现为红色（参见作者所著《摄影滤光镜的性能与使用》一书书末彩色附图3中所示）；若某不透明物体只

反射蓝光，则该物体在白光下就呈现为蓝色；余类推。若某不透明物体可将各可见光光波几乎全部均匀地反射回去，则该物体在白光下就呈现为白色；若某不透明物体可将各可见光光波几乎全部均匀地吸收掉，则该物体就呈现为黑色。又如，同一绿色不透明物体，在白光下呈现为绿色，而在红光或蓝光下则几乎呈现为黑色；同一白色不透明物体，在白光下呈现为白色，而在红光或绿光、蓝光下则分别呈现为红色、绿色、蓝色，当该白色物体分别在红光加绿光、红光加蓝光、绿光加蓝光下时，则分别呈现为黄色、品红色、青色。蓝色衣服在低压钠灯下（辐射黄光谱线）的色觉呈现为黑色，余类推。

颜色一般可从色别（又称色相）、饱和度（又称纯度）、明度三个基本特征（属性）加以表示。

色别指色与色之间的本质区别。色别取决于组成该色光之光波波长的具体数值（在摄影界还存在另一种意义的“色别”：把偏红、黄色调的色称为暖色，把偏蓝、青色调的色称为冷色）。

饱和度指色的纯度，即该色与纯光谱色的接近程度，其中饱和度愈高，色彩愈鲜艳。

明度指色的明暗、深浅程度，即色所呈现出的灰的程度（在摄影界还存在另一种意义的“明度”：各种高饱和度光谱色之间在视觉上的明暗差别，例如黄绿色的明度最高，显得最明亮，橙色与绿色次之，红色与青色又次之，而紫色的明度最低，显得最暗）。

此外，摄影界把非彩色的黑、灰、白称为消色。一般把反光率大于70%的消色称为白色，把反光率在10～70%的消色称为灰色，而把反光率小于10%的消色称为黑色。消色物体具有非选择性吸收特性，而彩色物体具有选择性吸收特性。

辐射光能的物体称为发光体或光源。不同光源所发出之光线的光谱能量分布往往不同。如图1—2中所示。从图中可知，在

白炽灯所发出的光中红、橙色光的能量远远多于蓝、紫色光，在日光（即昼光）中所含的蓝、紫色光又略多于红、橙色光，而荧光灯所发出的光中，某些波长处的能量相对特别集中，以至使其光谱能量分布曲线上呈现出若干陡峭的波峰。

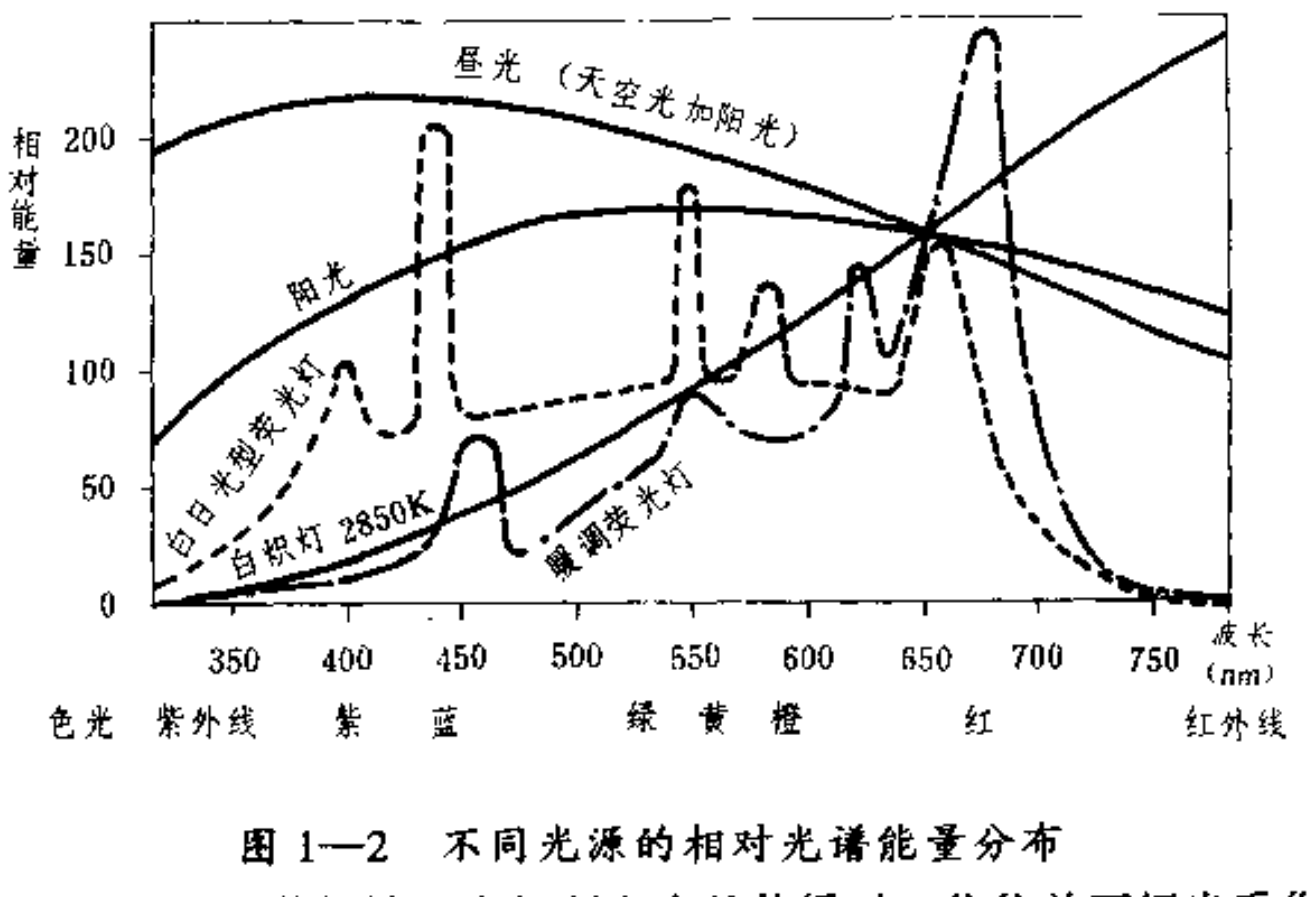


图 1—2 不同光源的相对光谱能量分布

在几何光学领域，人们研究光的传播时，往往并不把光看作电磁波，而是将光视作“能够传输辐射能量的几何线”，并称其为“光线”。光源的发光被看成是光源向四周发出无数条几何线，并沿着每一条几何线向外发射能量。人们关于光线的概念，是从无数客观光学现象中抽象出来的。同时，人们又利用光线的概念说明和解释自然界中许多光的传播现象，并用光线的概念设计出了目前所使用的绝大多数光学仪器。

二、人眼的特点

人眼观看景物时，自景物投射来的光线经眼睛晶状体会聚

后，可在眼睛视网膜处结成被观察景物的清晰影像，从而使人产生视觉。

人眼视网膜主要由柱形细胞和锥形细胞构成。柱形细胞对光线的强弱非常敏感，它可辨别在非常低的照明条件下的阴暗物体，但它没有辨别颜色的能力。锥形细胞对弱光极不敏感，只能感受强光，但它具有辨别强光颜色的能力。正因如此，人眼睛在光线微弱的夜晚，不能很准确地辨别物体的颜色，而感到一切物体似乎都是灰色和黑色构成的。

人眼睛对可见光中各波长之色光的敏感程度并不一致。在明亮环境下观看物体时，人眼对555nm的黄绿光最敏感，而对红光和紫光的敏感度最低。亦即当人眼观看功率相等的各色光时，认为555nm的黄绿光最明亮，而红光和紫光最暗。在阴暗环境下观看物体时，人眼对约510nm的绿光最敏感，对红光和紫光的敏感度仍最低。

若将人眼最敏感之色光的视觉相对亮度（即视觉相对灵敏度）定为1.0（即100%），则同功率的其它各色光在人眼视觉中的相对亮度百分数，即为该色光的视见函数（即光谱光视效率）。人眼在环境亮度大于3cd/m^{2}下的视觉称为**明视觉**，在环境亮度小于0.05cd/m^{2}下的视觉称为**暗视觉**。人眼明视觉的视见函数曲线和暗视觉的视见函数曲线，分别如图1—3中A和B所示。人眼的视见函数见表1—2中所示。

人眼睛中央有一瞳孔，可随着外界光线的强、弱而收小和开大。在强光下瞳孔直径最小可收小至约2毫米，在弱光下瞳孔直径最大可开大至约8毫米，两者通光面积约差16倍（其通光量的差别仅相当于摄影镜头上4挡光圈的差别）。瞳孔的上述功能以及视网膜上柱形细胞和锥形细胞可自动调节其灵敏度的感光特性（亦即人眼的视网膜好似一个可以自动改变其本身感光度值大小的特殊感光材料），使人眼对外界光线具有很强的适应性——

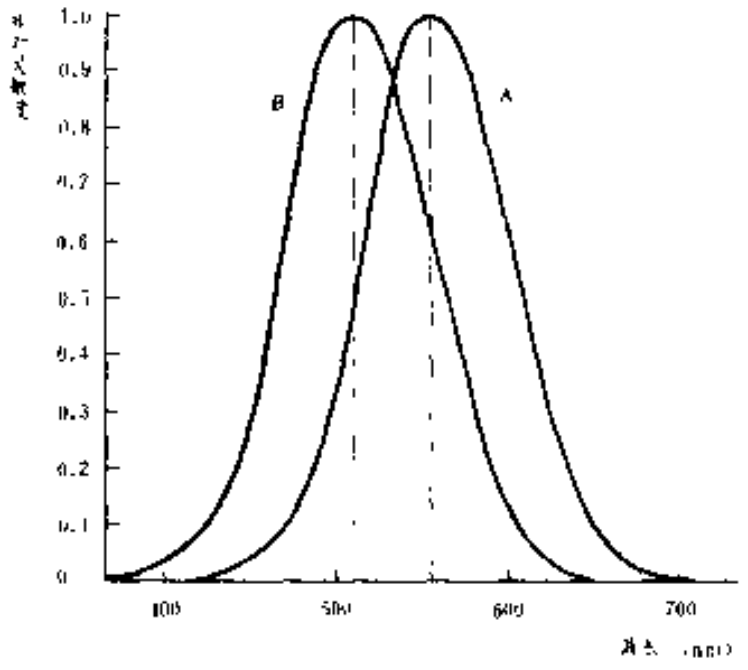


图 1—3 视见函数曲线

人眼所能耐受的最高光强与所能感受的最低光强之间约差二百亿倍。人眼所具有的这一特性称为**全面亮度适应**。

当人们从黑暗的室内突然来到明亮的阳光下，或从明亮的室外突然走进黑暗的室内时，人眼不能立即清晰地观察周围物体，待经过一段时间后，人眼才能逐渐适应周围环境，并进行正常观察。人眼的上述适应过程，分别称为**亮适应**和**暗适应**。人眼亮适应所需的时间比较短暂，一般只需一二分钟左右，而人眼暗适应过程却比较缓慢，常需十几分钟以上。

表 1—2 人眼对不同波长光波的视见函数

波长（毫微米）	视见函数	波长（毫微米）	视见函数
400	0.0004	580	0.870
410	0.0012	590	0.757
420	0.0040	600	0.631
430	0.0116	610	0.503
440	0.023	620	0.381

续表

波长（毫微米）	视见函数	波长（毫微米）	视见函数
450	0.038	630	0.265
460	0.060	640	0.175
470	0.091	650	0.107
480	0.139	660	0.061
490	0.208	670	0.032
500	0.323	680	0.017
510	0.503	690	0.0082
520	0.710	700	0.0041
530	0.862	710	0.0021
540	0.954	720	0.00105
550	0.995	730	0.00052
555	1.000	740	0.00025
560	0.995	750	0.00012
570	0.952	760	0.00006

人眼在观察景物时，对景物的局部亮度也具有较强的适应性。人眼**局部亮度适应**又分为二种形式；旁侧亮度适应和先后亮度适应。

当人眼同时观察被摄主体及其周围大面积背景时，由于人眼对旁侧背景亮度的适应，以至常影响人眼对主体亮度的感觉和印象，此现象称为**旁侧亮度适应**。例如，同一灰色物体，当其周围是大面积的明亮物体（如白色）时，人眼会觉得该灰色较深暗；当其周围是大面积的黑暗物体（如黑色）时，人眼会觉得该灰色

较浅淡、明亮。又如，同一有色被摄主体，在大面积明亮背景衬托下，会使人感到被摄主体的颜色显得较深暗；而在大面积黑暗背景映衬下，会使人感到被摄主体的颜色显得较明亮。

当人眼先后观察不同亮度的物体时，由于人眼对先一物体亮度的适应，以至常影响人眼对后一物体亮度的感觉和印象，此现象称为**先后亮度适应**。例如，当人眼观察某很亮物体一段时间后，突然将视线转向一颜色较淡的物体时，人眼可看到一个黑影，此黑影形状恰好与刚才所视之明亮物体相似。该黑影的出现是因人眼在观察明亮物体时，视网膜上相应部位已通过降低灵敏度与其适应，一旦将视力移开后，该局部视网膜的灵敏度尚未恢复而引起的，此黑影又称后像。

此外，人眼还具有下列很强的色觉适应性：

1. **全面色觉适应**。人们在中午、早晚、晴天、阴天下观察同一景物时，往往看不出景物在颜色上有何不同，此视觉现象称为全面色觉适应。其实在上述情况下，自然光的光谱成份有着明显变化，该景物的颜色也有着显著差异。只是由于当自然光光谱成份改变时，所有景物的颜色均发生改变，从而影响了人的判断力，再加上人眼可按光源成份自动调节其色觉灵敏度，以及人们的记忆、印象、经验等对视觉的心理影响，因而才使人们对上述景物颜色的全面变化熟视无睹。

2. **局部色觉适应**。人眼对景物的局部颜色也具有较强的适应性，以至常影响人眼对其它颜色的感觉。局部色觉适应又分旁侧色觉适应和先后色觉适应二类。

某物体颜色使人产生的色觉，受该物体周围或邻近大面积背景颜色的影响而略有变化的现象，称为**旁侧色觉适应**。例如，在大面积背景颜色的映衬下，会使人感到物体的颜色好似向该背景色的互补色趋近（红、绿、蓝背景将使灰色物体分别带有轻微的青色、品红色、黄色的色调），故以某颜色的补色作为大面积背

景色时，该颜色在背景色的衬托下将显得饱和度更高，色彩更鲜艳，而在相近色背景映衬下的颜色将显得饱和度下降（可营造出淡雅、柔和的色调氛围）。

先后观察不同颜色的两物体，人眼对后观察物体所产生的色觉受先观察物体颜色的影响，而略有变化的现象，称为**先后色觉适应**。其规律如下：当先观察一彩色物体然后突然观察另一颜色或白色、灰色物体的瞬间，在后者上面好似有一个前者的彩色后像，该后像的颜色接近于后一物体颜色与前一物体颜色的减色效果。例如，在白墙前放一蓝布，突然拿走该布，则人眼将在该布原位置处感到有一接近黄色的后像——白色减去蓝色剩黄色，余类推；又如，先看黑色背景前的一朵红花，一旦将视力移向黄色背景上时，眼前将呈现接近绿花的色觉（黄色减去红色后剩绿色）。

由于人眼存在上述亮度适应和色觉适应，因而摄影者在观察景物时应注意根据理性分析与经验，校正自己的视觉误差，以获得正确判断。例如，在估计曝光时，为减小误差不应单凭直观印象，而应充分结合已往经验进行判断。为丰富自己的曝光经验，平时可有意经常借助测光表来验证自己的估计结果。此外，在摄影棚或照相室内布光时，请勿用眼睛直接观看光源，以免高亮度的灯光使眼睛产生亮度适应，从而使灵敏度已降低的眼睛不能准确区分布光中暗与更暗的细微差异。

若有两个彼此相距极近的光点，其各自所发出的光线进入人眼睛后，成像在视网膜上的同一视觉细胞上，或分别成像在两相邻的视觉细胞上，则人眼睛无法区分开该两光点，而将两光点视为同一光点。只有当两光点各自所发出之光线在进入人眼后，分别成像在两非相邻的视觉细胞上后（即两视觉细胞之间必须间隔着一个或一个以上的不同受光的其它视觉细胞时），人眼才能分辨开该两光点。当两视觉细胞之间只间隔着一个视觉细胞时，则

该两视觉细胞与人眼晶状体中心所构成的夹角约为 1′（1 分）。因此，人眼在观看景物时，所能分辨开之两光点的最小夹角——**人眼的最小分辨角**，约为 **1′**（约相当于 1/3437.7≈1/3440 弧度）。

已知每 1°角含 60′，亦即在 360°圆周角内共含 21600′。故此人眼相当于在 360°圆周角内共可分辨开黑背景下的 21600 个极小的光点。

又知以人眼晶状体中心为圆心，人眼在明视距离（250 毫米）处所对应的圆周长为 2π×250 毫米。故此人眼在明视距离处可以分辨开黑背景下之两极小光点的最小间距L约为**0.073毫米** ①（即 L = 2π×250÷21600 = 0.072722 毫米）。

而此最小间距的倒数，就是人眼在明视距离处观察黑背景下之极小光点的分辨率能力，约为 13.75 光点/毫米（即 $R_{眼}$ = 1/L = 1/0.072722 = 13.751 光点/毫米）。

此人眼在明视距离处的分辨能力，相当于打印机的打印精度为 700DPI（即 13.751×2×25.4 = 698.55≈700DPI）。

由于论述人眼分辨率时不是分辨黑背景下之极小的光点，而是分辨由黑白相间且黑白等宽之线条组成的“黑白线对”，因此人眼能分辨开之两白线条之间的最小间距——黑线条的宽度，应为 0.073 毫米。而已知白线条又与黑线条等宽，显然白线条宽度也应为 0.073 毫米。故此，被能人眼分辨分开的“一对”相邻黑白线条之总宽度约为 0.146 毫米（即 0.072722×2 = 0.145444 毫米），亦即人眼在明视距离处的分辨率 $R_{眼}$ 约为 **7 线对/毫米**（即为 $R_{眼}$ = 1/L = 1/0.145444 = 6.8756 线对/毫米）。

由于人在观察景物时，存在着近大远小的现象，因此人眼在

① 由于 0.073 毫米与 0.1 毫米很接近（而当照明条件不好时人眼的分辨能力将有所下降），故有些书籍中近似认为：“人眼对于几何点和直径 0.1 毫米的小圆圈是分辨不出来的”，“任何直径小于 0.1 毫米的小圆圈，我们眼睛都会把它看作几何点”。

同一视角下观察景物时，观察距离愈远，能分辨开之二物“点”的间距必将相应愈大。

例如，人们看电影时，观众一般无不认为电影院的银幕是一块洁白平整的幕布，其实当走至银幕跟前就会发现，银幕上原来打出了无数个小孔，这些小孔可使银幕后的扬声器发出的声音能够较顺利地穿过，以便到达观众的耳中。人眼之所以在看电影时未能发现银幕上的小孔，正是因为该小孔对观众眼睛所构成的视角远远小于 1/3440 弧度之缘故。

又如，19 英寸电视机的对角线长为 482.6 毫米，屏幕高约为 290 毫米，PAL 制电视扫描为 625 行，所以扫描行距约为 0.464 毫米，由于 19 英寸电视机的观看距离应大于 2 米，而人眼观看 2 米远处物体的最小分辨间距为 $2000 \times \frac{1}{3440} = 0.581\text{mm}$，因此人眼将感觉不出电视屏幕上的影像是由“行”组成的。

人眼对高对比度（即高反差）的景物，如对黑白相对比所形成的界限，在观察时很易于进行清晰的分辨；而对低对比度（即低反差）的景物，如对白与更白、灰与更灰、黑与更黑相对比所形成的界限，在观察时较难以分辨。前者如观察印刷在白纸上的黑字；后者如观察写在黑纸上的黑铅笔字，蓝衣服上沾污的蓝墨水痕迹，以及朝向明亮天空观察向下降落的透明雨滴。

人眼分辨一个物点与另一个物点彼此是否重合，或分辨一条直线与另一条直线彼此是否对准的过程称为**瞄准**。

例如，人眼对机械加工用游标卡尺之上下两列铅垂直线（尺寸标尺与游标标尺），分辨其彼此间的对准程度即为瞄准。而人眼对打印机所打印出之斜线、曲线，分辨其光滑程度的差异，也属于瞄准范畴。

人眼的瞄准精度与上述人眼视角分辨率是两个完全不同的概念，而又有所联系。人眼的瞄准精度将视被瞄准之两对象的形状

不同而有所差异，一般约为分辨率的 1/2 ~ 1/10。

人眼水晶体中心至视网膜黄斑处的距离约 22.8 毫米，此即人眼睛观看物体时的像距。

人眼水晶体的曲率可以调节，故该水晶体相当于一可改变焦距长短的凸透镜。人眼水晶体的焦距的变化范围如下：人眼在放松状态（即观看无限远景物时）的像方焦距约为 22.785 毫米（此时像方主点至角膜顶点的距离为 1.602 毫米），人眼在紧张状态（即观看最近处景物时）的像方焦距约为 18.930 毫米（此时像方主点至角膜顶点的距离为 2.086 毫米），显然人眼观看不同远近景物时是依靠微量改变人眼中水晶体的焦距而实现调焦的。

人眼通过改变水晶体的曲率（即焦距）来对位于不同远近的物体进行调焦，以使人眼能看清该物体。年青人当调节眼睛水晶体的焦距时，可清晰观看最近距离约 10 至 15 厘米的物体。显然，经过调节人眼水晶体的焦距长短，人眼一般可以观看自无限远至 15 厘米之间任意位置处的景物。人眼能够进行长时间观察，而又不易感到疲劳的最近物距称为**明视距离**，约为 25 厘米。

人眼在不转动眼球状态下观察物体时，单眼的视场均为一椭圆形，其最大视场角如下：横向约为 150°，纵向约为 120°。电影、电视画面之所以为矩形也正是因为人眼水平视角大于铅垂视角之故。按人眼视场各部位分辨能力的高低，可将人眼视场自中心向外围分为下列四个区域：

最清晰视场，视场角约为 1°多，该视场与视网膜黄斑上的中心窝部位相对应，故能最清晰地分辨物体的形状、细节及细微的颜色差别（在最清晰视场部位只能对光强大于 0.1 勒克斯的成像光线感知）。

清晰视场（位于最清晰视场外围），横视场角和纵视场角约分别为 8°和 6°，该视场所对应的像场为视网膜上的黄斑部位，故能较清晰地分辨物体的形状、细节及细微的颜色差别（在清晰视

场部位对 0.0001 勒克斯的极微弱光也能感知)。

明视场（位于清晰视场外围），横视场角和纵视场角约分别为 30°和 22°，在明视场范围内，人眼能分辨出物体的形状，但不能分辨出物体的细节。电影、电视用摄影镜头系列中的标准焦距摄影镜头之焦距值大小，就是以明视场之视场角大小定义的。

外围视场（位于明视场周围），在此视场范围内，人眼已不能辨认物体形状，但可警戒突然出现的物体、突发事件，并有助于人眼识别方向。

人眼在眼球不动的前提下观看景物时，人眼视场四周之景物看得并不清楚，而短焦距摄影镜却可把所摄范围内的景物均清晰地、一览无遗地记录下来（前提是各景物均在景深范围之内）；同时超广镜头所能摄取的景物空间范围，往往远远超出人眼的整个视场。

人眼无法看清远处景物的细节，而长焦距却拍摄下远处景物的较大放大率的影像，好似将远处景物拉近了，使之纤毫毕露。

由于人眼也有景深存在，故此当人眼在眼球不动的前提下专心致志地盯着被摄主体仔细观看时，眼睛对被摄主体前后的衬景、背景等很可能会熟视无睹、视而不见；以至当用小光圈拍摄出的照片冲扩出后才发现，人物头上怎么好似长出了一根电线杆或长出了一颗树，或电影演员身前怎么出现了话筒等而穿邦。

总之，摄影者充分了解人眼的上述特点及与摄影镜头成像之间的差异，对更好地营造画面将大有裨益。

此外，由于人眼横视场角大于竖视场角的特点，将使人观看排列成“⊥”形的长度相等的二直线段时，感觉铅垂的那一线段比水平的那一线段要长一些。人眼横视场角大的特点还导致诞生了左右宽的宽银幕电影（亦即宽银幕电影是沿横向较宽的矩形画面，而非沿高度方向较大的竖立矩形画面）。

三、光的加色效应与减色效应

面对周围五彩缤纷、万紫千红的客观景物，人眼是如何感受和分辨这众多颜色的呢？人眼视网膜上的锥形细胞共由三种组成。虽然三种锥形细胞均可感受到强度较高的可见光，但相比之下，其中一种对红光（约 600～700nm）最敏感（对其它波长之色光的灵敏度稍低），一种对绿光（约 500～600nm）最敏感，另一种对蓝光（约 400～500nm）最敏感。三者被分别称为感红、感绿、感蓝锥形细胞。三种锥形细胞在接受到光线时，将在大脑中产生各自不同的色觉信号。

当三种锥形细胞所受到的刺激程度相等时，人的大脑将其彼此叠加后便获得消色（白、灰、黑色）的感觉。其中当进入人眼的光线很强，从而使三种锥形细胞受到的刺激很大时，大脑即获得白色的色觉；当进入人眼的光线强度中等，从而使三种锥形细胞受到的刺激程度中等时，大脑即获得灰色的色觉；当进入人眼的光线非常微弱，从面使三种锥形细胞受到的刺激极小时，大脑即获得黑色的色觉。消色物体对可见光具有非选择性吸收的特点。

当三种锥形细胞所受到的刺激程度不等时，人的大脑将其彼此叠加后便获得彩色的感觉。例如，当红光进入人眼时，感红锥形细胞受到的刺激最强烈，大脑即获得红色的色觉；当绿光进入人眼时，感绿锥形细胞受到的刺激最强烈，大脑即获得绿色的色觉；余类推。

当三种锥形细胞中的任意两种同时受到刺激，且二者的刺激程度相等时，大脑将获得中间色的彩色视觉。例如，当感红、感绿锥形细胞所受到的刺激相等时，大脑获得黄色的色觉；当感红、感蓝锥形细胞所受到的刺激相等时，大脑获得品红色的色觉；当感绿、感蓝锥形细胞所受到的刺激相等时，大脑获得青色

的色觉。

若任两种感色锥形细胞上所同时受到的刺激程度不等，则随着上述刺激程度的种种细微变化和差异，大脑就会产生一系列有着微妙差别的相应色觉。例如，当感红锥形细胞受的刺激程度大于感绿细胞时，大脑产生橙色色觉；当感红细胞受到的刺激小于感蓝细胞时，大脑产生紫色色觉等。于是，人眼就得以观察到了周围世界中五彩缤纷、姹紫嫣红的美丽色彩。

总之，两种以上色光同时进入人眼，刺激视网膜锥形细胞，可使大脑获得另外一种颜色的色觉。这种由两种以上色光彼此叠加后所产生的综合色觉效果，称为光的**加色效应**。

若两色光按一定比例叠加后变成消色光，则称该两色光互为补色。例如，红光与青光、绿光与品红光、蓝光与黄光均互为补色。在彩色摄影中一般称黄、品红、青为三补色，称红、绿、蓝为三原色。

三原色光的加色效应如图 1—4 所示。

显然，根据加色效应原理，按各种不同比例使三原色光叠加、混合，则可模拟出自然界中的各种颜色。但应注意：给人色觉完全相同的两种色光，其光谱成份可能并不相同。此即“同色异谱”现象。譬如，波长 600nm 的单色光呈橙色，而由波长 570nm（黄光）与波长 630nm（红光）两色光适当叠加后的复色光也呈同样色觉的橙色。波长 520nm 的绿光与 670nm 的红光适当叠加后，可产生与波长 570nm 的单色黄光同样的色觉。

摄影者在拍摄中应充分估计到加色效应对所摄画面色彩的影响。譬如，在彩色摄影时，应注意周围彩色物体所反射之色光对被摄主体的影响，其中又以大面积色彩对主体阴影部位的影响最强（如绿草地上或绿树丛旁的人像易带有淡绿色调，红墙旁的人像易带有淡红色调；蓝天下的海水显得益发碧蓝、阴天下的海水变得灰蒙蒙等），对于上述色彩影响，有时需要加以避免（必要

时可用与其互为补色的色光加以中和），有时又要善于巧妙利用。

从含有多种色光的复杂可见光（如白光）中，减去若干单色光，获得另外一种色光的效应称为光的**减色效应**。

由光的减色效应可知，红、绿、蓝三原色滤光镜各自可以透过其本色光（即透过与该滤光镜颜色相同的色光），并透过中间色光中所含之该滤光镜的本色光，及吸收另外二种原色光；黄、品红、青三补色滤光镜，各自可以透过其本色光及构成该色光的两个原色光，并吸收另一种原色光。

例如，红滤光镜可以透过红光，及使黄光或品红光中的红光成分通过，并吸收绿光和蓝光；绿滤光镜可以透过绿光，及使黄光或青光中的绿光成分通过，并吸收红光和蓝光；蓝滤光镜可以透过蓝光，及使品红光和青光中的蓝光通过，并吸收红光和绿光；黄滤光镜可以透过黄光及红光和绿光，并吸收蓝光；品红滤光镜可以透过红光和蓝光，并吸收绿光；青滤光镜可以透过青光及绿光和蓝光，并吸收红光。

又如，黄与品红滤光镜叠加、黄与青滤光镜叠加、品红与青滤光镜叠加时，将分别只允许红、绿、蓝光透过；黄、品红、青三补色滤光镜叠加时，将阻止各种色光通过。

在上述减色效应中，减阻（吸收）色光的程度大小，将由于所用滤光镜本身的具体特性（如颜色的浓淡）不同而有所差异。譬如，三补色滤光镜叠加时，若三者的颜色均较淡，则叠加后三镜片本身呈中性灰色，此时白光尚能透过一部分，但强度明显减弱；若三补色滤光镜颜色均很浓，则叠加后三镜片本身呈黑色，此时白光将无法透过。此外，减色效应中被减阻（吸收）的色光，在所摄画面中将相对显得比较灰暗，而允许透过的色光在所摄画面中将相对显得比较明亮。

三补色滤光镜的减色效应如图 1—5 所示。

彩色摄影画面中所呈现出的美丽色彩，即是利用光的减色效

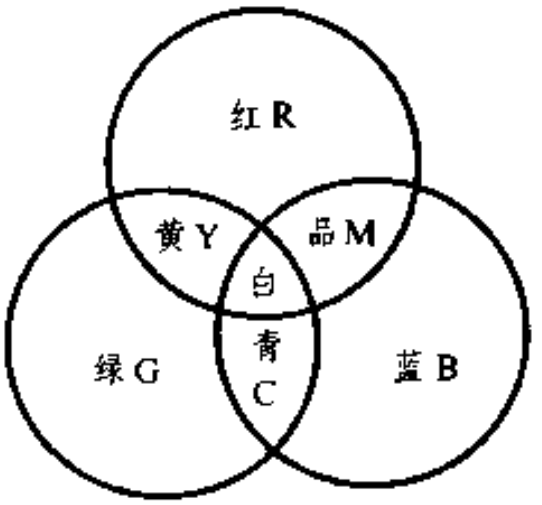


图 1—4　三原色光的加色效应

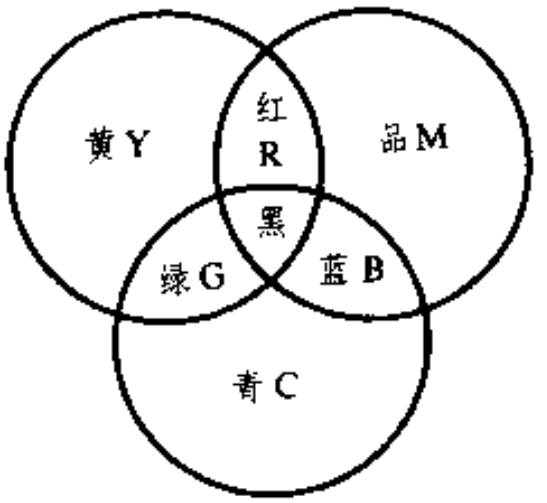


图 1—5　三补色滤光镜的减色效应

应形成的。而自然界中各种物体所呈现出的丰富颜色（发光体除外），也基本是由于光的减色效应形成的。譬如，黄色的树叶可反射红光和绿光及很少量的蓝光（即可将绝大部分蓝光吸收掉），从而使人产生黄色的色觉；绿色的树叶可反射绿光及很少量的红光和蓝光（即可将绝大部分红光和蓝光吸收掉），从而使人产生绿色的色觉。

四、光线传播的基本定律

几何光学理论认为，自然界中的光线在传播时遵循下列四条基本定律。

光的**直线传播定律**：光在各向同性的均匀介质中沿着直线传播。

光的**独立传播定律**：当自不同光源发出的光线沿不同方向在同一瞬间通过空间同一点时，各光线彼此互不影响（而若前进方向不同的二物体在空中相遇，二者的前进方向必将互相干扰）。

当一束光线投射到两种透明介质的光滑分界面时，一般将有

一部分被反射回原介质中（称为反射光线），另一部分则通过分界面进入另一介质中（称为折射光线）。人能从镜子中看到自己的容貌，正好说明自然界中的光线存在着反射现象；而当人从水面观看一端斜着浸入水中的筷子时，感到位于水中的那段筷子好似向上弯折了，这种现象则说明自然界中的光线还存在着折射现象。

光的**反射定律**：入射光线（图 1—6 中 AB 光线）、反射光线（图 1—6 中 BC 光线）和分界面的法线（图 1—6 中 NN′）位于同一平面内，入射光线、反射光线位于法线两侧，入射角（i）等于反射角（r）（如图 1—6 所示）。

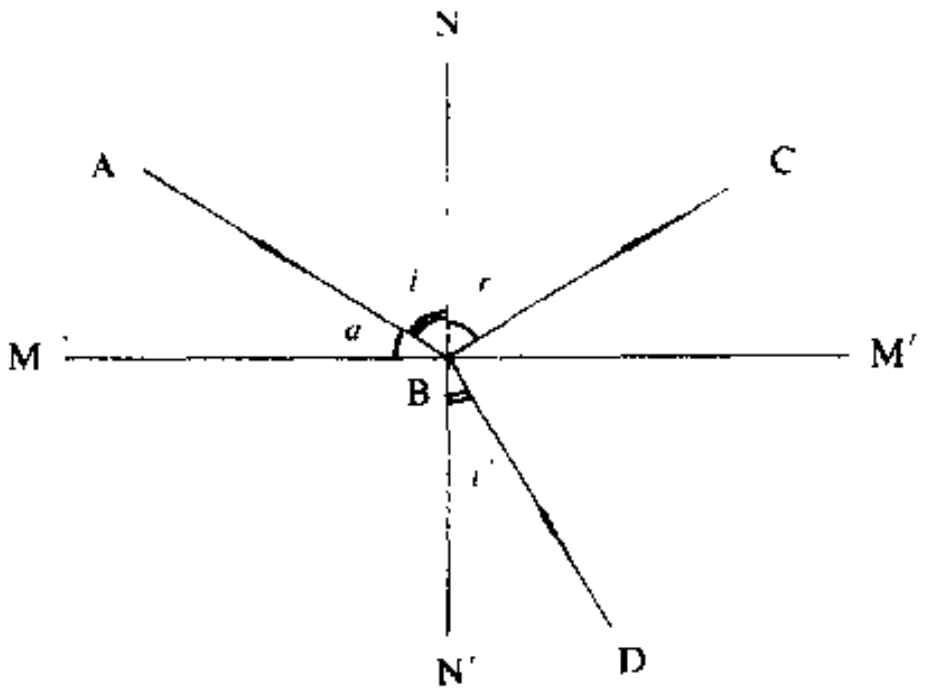


图 1—6 反射定律与折射定律

光的**折射定律**：入射光线、折射光线（图 1—6 中 BD 光线）和分界面的法线位于同一平面内，入射光线、折射光线位于法线两侧（如图 1—6 所示），入射角的正弦与折射角（i'）的正弦之比为一常数，该常数仅与两种介质的折射率有关。

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = n_{1\,2} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (1—1)$$

式中 i 为光线在介质 1 中的入射角

i' 为光线在介质 2 中的折射角

$n_{1,2}$ 为当光线自介质 1 进入介质 2 时，介质 2 对介质 1 的相对折射率

n_1 为介质 1 的折射率

n_2 为介质 2 的折射率。

在日常生活中经常会遇到折射现象，例如前述一只笔直的筷子，当把它的一端插入一杯水中后，由于光的折射，使得人眼觉得水中的那段筷子好似弯折而不再笔直了。又如，在杯底放置一枚硬币，同时自杯口观看该硬币，接着在人眼不动的前提下缓慢前移杯子，此时随着杯子的前移，杯子口渐渐遮挡住硬币，当杯口刚好全部遮住硬币的瞬间，令人眼与杯子均保持不动，尔后往杯中注满清水，此刻原先已被杯口遮住的硬币突然又能看到了。

某介质的折射率 n 等于光在真空中的传播速度 C，与光在该介质中的传播速度 v 之比 $n=\frac{C}{v}$　　(1—2)

在任一均匀介质中，光的传播速度相对该介质为一常数，故该介质的折射率也为常数。

不同材料的折射率一般不等，例如金刚石为 2.42、玻璃为 1.44～1.92、加拿大树胶为 1.54、水晶为 1.54、甘油 1.46、萤石为 1.43、酒精为 1.36、乙醚为 1.35、水为 1.333、冰为 1.309、空气近似为 1。

摄影镜头的成像过程就是依据上述光的直线传播定律、独立传播定律、折射定律、甚至反射定律（指设有球面反光镜的折反射式摄影镜头）进行的。

在日常生活中利用上述定律的实例很多。例如，当你于夜间在高速公路上驾车行驶时，会看到前方路边明亮的交通标志像彩灯一样闪闪发光，而一旦车开过标志后向后观看，公路上漆黑一

片，根本没有灯光。原来这些交通标志牌上涂有一层特殊金属反光膜，膜表面又粘贴着一层由折射率大于 2.2、直径为 0.02～0.03 毫米的细微光学玻璃珠。当行驶中之汽车前灯发出的光线照射到这些标牌时，入射光线经过玻璃微珠的折射、反光膜的反射、玻璃微珠的再次折射，于是反射光变为与入射光平行的光线又定向地投射回光源处。由于上述反光材料的反光率比普通油漆高上百倍，反射距离可达很远（上千米以上），故此这类标牌对司机形成了极佳的可视度。这比用专门灯光对普通交通牌进行照明，既节省了电能，又明亮得多。

此外，光线传播中还存在光路可逆定理和全反射现象。

光路可逆定理：当光线能自甲点传播到乙点时，则自乙点投射的反向光线就必定能沿同一条路线自乙点传播到甲点。

由于存在光路可逆定理，因而当摄影者使用测光元件位于取景器部位的单镜头反光照相机的自动曝光挡自拍时，必须先将照相机的取景目镜窗遮严，否则人离开照相机自拍时，自取景器目镜窗逆射入的光将影响照相机自动测光的精度。同理，使用反光遮光器的电影摄影机拍摄中，人眼若离开取景器目镜处，也需关闭目镜再拍摄，否则自目镜处逆射入的光线将导致所摄画面出现灰雾。

光的**全反射**：当光自光密介质射向光疏介质，且光线的入射角增大到某一定值时（该值与两介质的折射率有关，称为临界角），折射角刚好等于 90°，若入射角继续增大，则光线不再发生折射现象——入射光线被全部反射回原光密介质中，这一现象称为全反射。

由于在理论上全反射可使入射光全部反射回原介质，而反光镜镜面的金属镀层对入射光有吸收作用，故此光路中全反射往往优于一般镜面反射。也正因如此，在光学系统中为了实现光路转折，通常用反射棱镜来取代平面反光镜。

光导纤维就是应用光的全反射现象的典型实例：单根玻璃纤维的直径一般为 5 ~ 100μm，该玻璃纤维的折射率为 1.6 ~ 1.8，其外皮的折射率为 1.4 ~ 1.5。由很多上述纤维集束而成的光导纤维很柔软、可曲折，故可使光线沿光导纤维形成的任意路线进行传播（如作人体食道、胃壁镜检，参见第四章第三节八中内容）。

五、光 的 偏 振

光波由于振动方向与其传播方向互相垂直，故称为横波。

通常热辐射光源所辐射出的光波，对于光的传播方向是对称而又均匀分布的。在垂直于光波传播方向的平面上，光的振动沿各个方向呈均匀分布（如图 1—7 所示，图中 Z 轴为光波传播方向），且各振幅彼此相同，亦即在沿传播方向的各个平面内，均存在着相同的振动能量，则这种光波称为**自然光**。

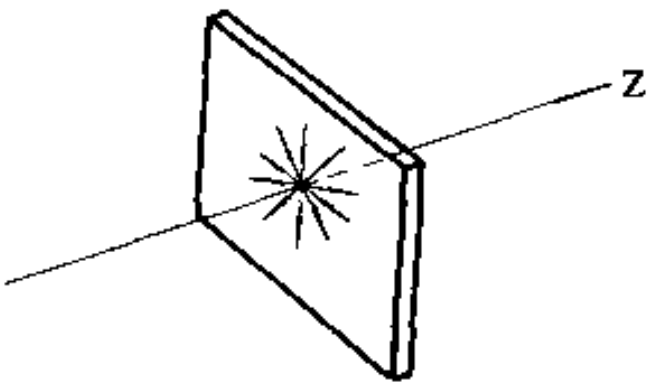


图 1—7　自然光

若在垂直于光波前进方向的平面内，光振动仅限于某一固定方向，则该光波称为**偏振光**。如图 1—8 所示。

若光波在沿传播方向的某一平面内的振幅很大、振动很强，而在沿传播方向的其它临近平面内的振动显著减弱，则该光波称为**部分偏振**光。显然，偏振光和部分偏振光的振动皆未按空间均匀分布。

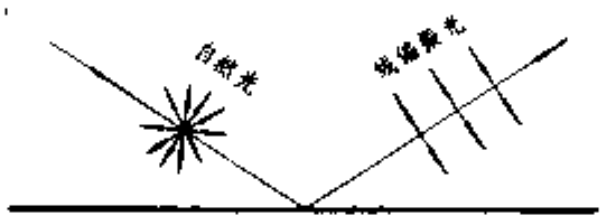


图 1—8 自然光与偏振光

研究光在两种透明介质光滑分界面上的反射与折射现象可知，当入射角 i 和折射角 i' 之和等于 90°时，其反射光为线偏振光。

已知 $i + i' = 90°$，由图 1—6 又知 $i + \alpha = 90°$

$$\therefore \quad i' = \alpha$$

$$\therefore \sin i' = \sin\alpha = \cos i$$

由公式（1—1）知

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = n_{1.2} = \frac{n_2}{n_1}$$

代入

$$\frac{\sin i}{\cos i} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\therefore \quad \operatorname{tg} i = \frac{n_2}{n_1} \qquad (1—3)$$

总之，当光线投射到两种透明介质的光滑分界面上时，若入射角的正切等于第 2 种介质的折射率与第 1 种介质的折射率之比，则反射光线为线偏振光。此定律称为**布儒斯特定律**（Brewster）。此时的入射角 i 称为布儒斯特角，俗称线偏振光的起偏角。

由公式（1—3）可知，当光线由空气射入折射率为 1.54 的玻璃中时，反射光为线偏振光的起偏角是 57°；当光线由空气射入水中时，反射光为线偏振光的起偏角是 53°。

当阳光投射到大气层时，大气层中的空气分子将使阳光发生散射。由于空气分子受阳光照射后所具有的特殊振动特性，故使来自天空中与阳光投射方向成 90°角方位的天空散射光，具有线偏振光性能，而在其临近天空具有部分偏振光性能。并且天空愈

清澈、洁净、干燥、愈蓝，上述偏振光愈强烈。因此，早晚时南北天空与天顶的蓝色天光，白天时北方天空的蓝色天光，含有大量线偏振光（但若上述天空被云层遮蔽，以至蓝天变得浑浊灰白时，则散射光即失去其偏振性；同理，正午时来自地平线的白色天空光虽也与阳光投射方向成90°角，但因微尘遍布、空气浑浊，且散射光需穿过稠密的空气层，因而也不具有线偏振性）。

偏振镜（又称偏振片）是一种只能让一个振动方向的光通过的中性滤光镜。自然光通过偏振镜以后，便成为线偏振光，且光的总能量减弱。该线偏振光的振动方向，称为此偏振镜的偏振方向。

若在线偏振光前方放置一偏振镜，并使其偏振方向与该线偏振光的振动方向相垂直，则该线偏振光将无法透过此偏振镜。如图1—9所示。

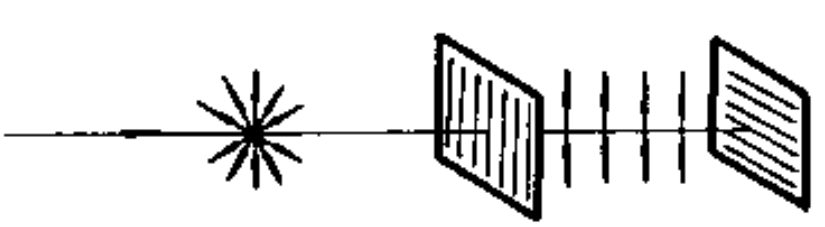


图1—9 自然光与偏振镜

综上所述可知，摄影时获得线偏振光的方法主要有下列二种：1. 利用偏振镜，2. 使光线投射到透明介质表面上的入射角等于布儒斯特角。此外，由于大气分子的散射作用，在与阳光投射方向成90°角的蓝色天空上，也存在着大量偏振光。

摄影时去除或避免有害偏振光的方法主要有下列三种：1. 利用偏振镜，2. 使自然光入射角远远偏离布儒斯特角，3. 避免拍摄与阳光投射方向成90°角的蓝色天空。

六、光 的 衍 射

光的衍射又称光的绕射。

几何光学认为，自点光源发出的光波，当通过小圆孔、狭缝等障碍物平面，到达屏幕上时，其几何投影的轮廓应非常明晰，光强分布应非常均匀，阴影内应完全没有光。然而，实际并非如此。

经实验可知，当点光源发出的光波通过上述障碍物时，有部分光线偏离光的直线传播定律，绕过障碍物进入其几何阴影区，并且使非阴影区的光强分布也变得不均匀，这种现象称为光的衍射。

例如，某障碍屏中央有一直径为 2 毫米的小圆孔，其前方 3 米远有一点光源。当点光源发出的光波通过该屏上的小圆孔，到达后方 1 米处的幕上时，该幕上呈现出的并不是一个轮廓明晰、亮度均匀的小光斑，而是一个由明暗相间的若干同心圆环构成的衍射圆，而该衍射圆的外径远大于按几何光学观点所应结成的小光斑直径。

无限远处发光点经光学系统所结成之衍射像的放大图，参见图 3—27 中所示。

七、棱　　镜

具有两个以上相互斜交之平面的光学元件称为**棱镜**。

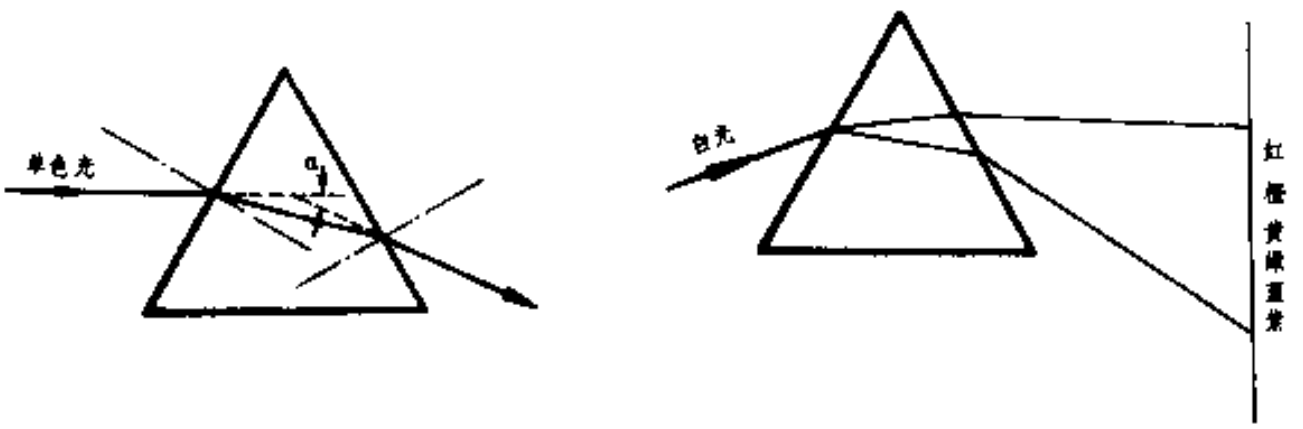
根据棱镜在光路中所起的作用，可将棱镜分为折射棱镜和反射棱镜两类。

最常见的折射棱镜是横截面为三角形的三棱镜。在折射三棱镜上，光线入射面与出射面之间的夹角称为顶角，顶角所对的棱

镜表面称为底面。

当一束单色光射向位于空气中之折射三棱镜的一个侧面，并通过棱镜，从另一个侧面射出时，光线方向将发生明显变化——出射光线向棱镜的底面偏折。这是由于该光线经过三棱镜的两个侧面时，先后发生的两次折射均向该三棱镜的底面偏折所造成的。如图 1—10a 所示。由公式（1—1）可知，图中光线的偏折角度 α 跟三棱镜本身材料的折射率高低和入射角及顶角的大小有关。

当一束白光射向位于空气中之折射三棱镜的一个侧面，并通过棱镜，从另一个侧面射出时，该白光将发生色散——在屏幕上形成一条由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫诸色光组成的彩色光带。若比较上述诸色光可以发现，各色光通过三棱镜时的偏折角度不等，其中红光的偏折角度最小，紫光的偏折角度最大。如图 1—10b 所示。（参见作者著《摄影滤光镜的性能与使用》一书书末彩图 1 中所示）。之所以出现上述现象，是由于同一棱镜材料对不同色光具有不同的折射率之故。表 1—2 中所列为某冕玻璃对不同色光的折射率值。



a.光线通过折射三棱镜后向底面偏折　　b.白光通过折射三棱镜时发生色散

图 1—10　折射三棱镜

反射棱镜可通过其若干表面代替平面反射镜（利用全反射定

律或在反射面上镀银、铝等反光层），以达到使光束在棱镜内反射并改变方位的目的。

表 1—2　　某重玻璃的各色光折射率

色光种类	红　光	橙　光	黄　光	绿　光	蓝　光	紫　光
折射率 n	1.513	1.514	1.517	1.519	1.528	1.532

最常见的反射棱镜也是三棱镜。反射三棱镜可通过全反射定律使光轴转折。如图 1—11 所示。图中光轴通过反射三棱镜后，转折了 90°。

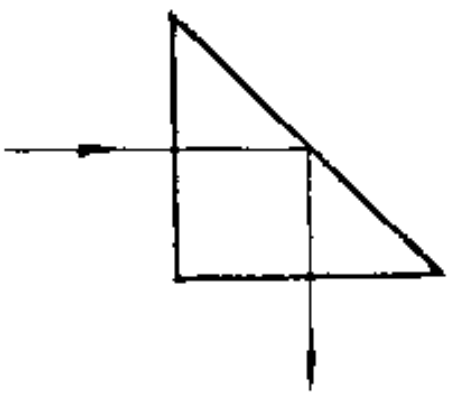
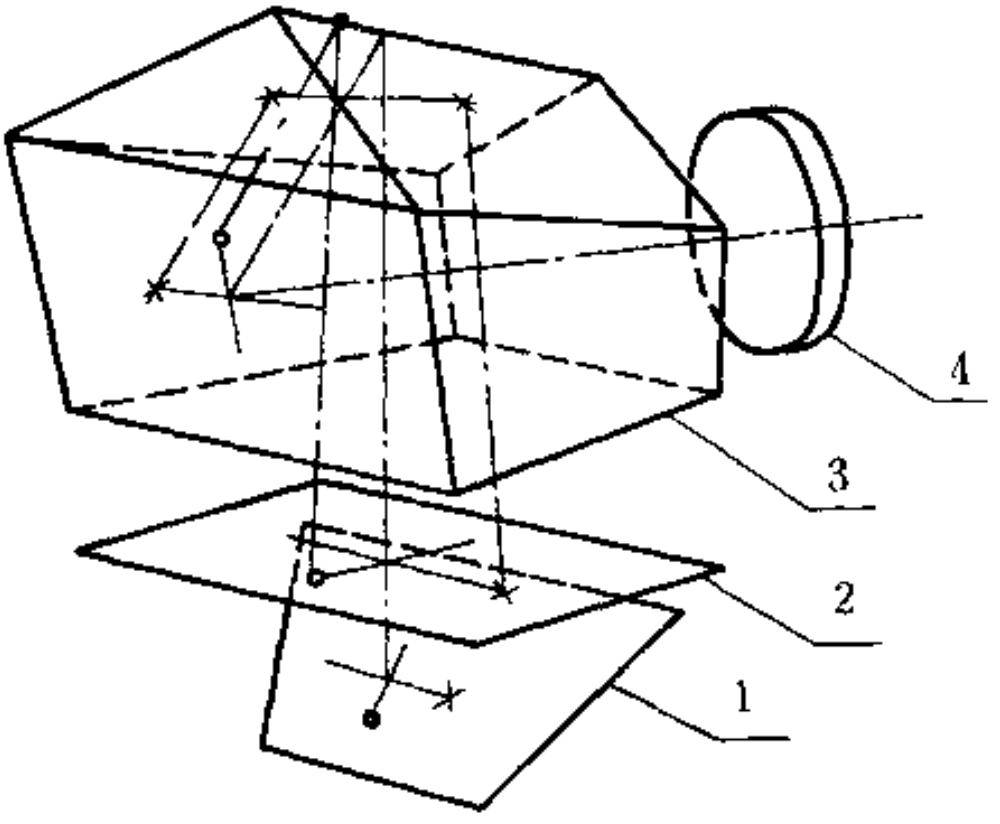


图 1—11　反射三棱镜

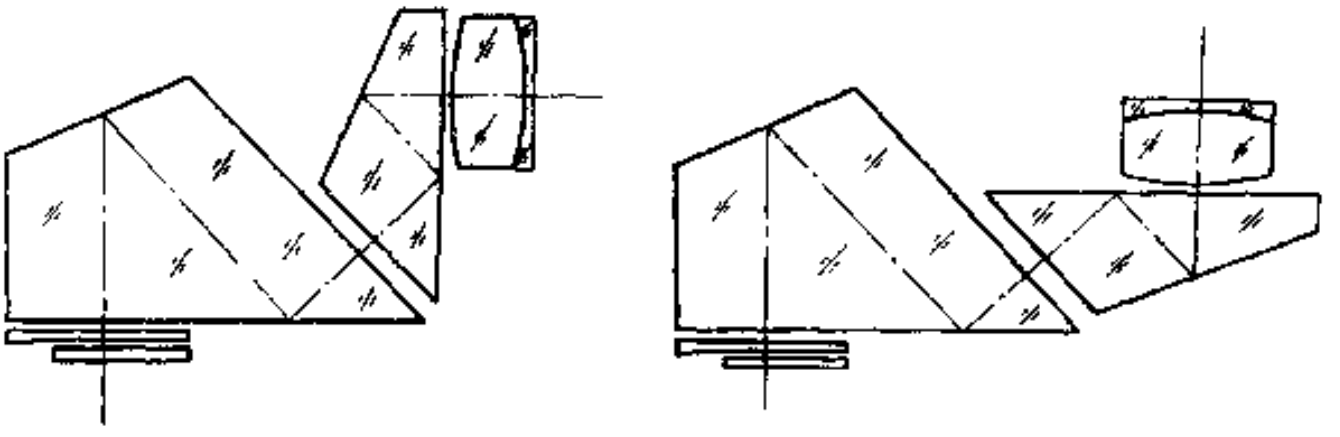
照相机上应用最多的反射棱镜是屋脊五棱镜。该五棱镜主要应用在单镜头反光照相机上，其作用是将照相机调焦屏上左右颠倒的影像，再左右颠倒回来，使摄影者从取景目镜中看到与景物方位完全一致的影像，从而消除俯视磨砂玻璃取景器的取景错觉。屋脊形五棱镜的倒像原理如图 1—12 所示——影像经该棱镜后，上下方位不变，而仅左右方位颠倒。

图 1—13 所示为日本产佳能新 F1 型 135 照相机的平、俯视兼用棱镜快速 FN 取景器。该取景器中有二片特殊的四棱镜，其中一个四棱镜可作绕入射光轴转动 180°，从而使该取景器既可将目镜光轴调至水平位置，进行平视取景；又可将目镜光轴调至铅垂位置，进行俯视取景。此取景器的另一特点是人眼可在取景目镜后方 60 毫米的位置上，观看到全视场画面（即可远眼点取



1. 反光镜　2. 调焦屏　3. 屋脊形五棱镜　4. 取景目镜

图 1—12　屋脊形五棱镜的倒像原理

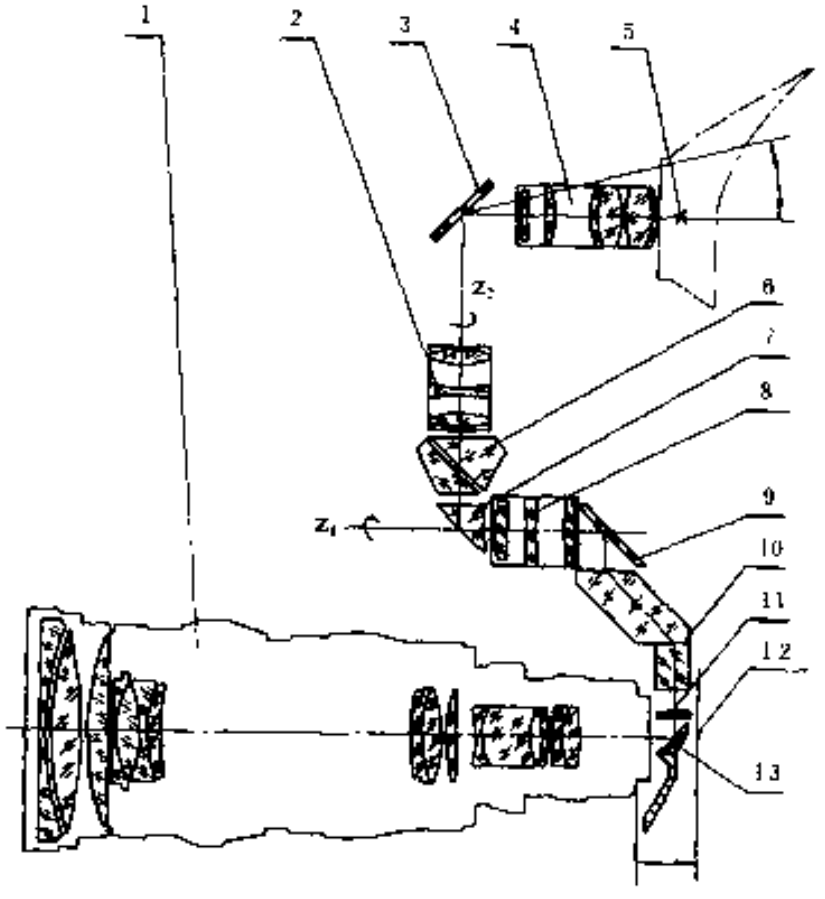


a. 平视　　b. 俯视

图 1—13　平、俯视兼用棱镜取景器

景），从而有利于快速取景，及适于乘坐在直升飞机、三轮摩托车等颠簸运动工具上，或戴厚棉帽时进行取景与拍摄。

在电影摄影机上应用最多的是全反射三棱镜和别汉（Pechan）棱镜。



1. 摄影镜头 2. 第二物镜 3. 反射镜
4. 取景目镜 5. 取景眼点 6. 别汉棱镜
7. 直角反射三棱镜 8. 第一物镜 9. 反射镜
10. 屋脊棱镜 11. 磨砂玻璃屏 12. 像平面
13. 反光遮光器

图 1—14 甘光 S16-XW 型电影摄影机的摄影与取景光路

别汉棱镜主要应用于近代反光取景式电影摄影机上。别汉棱镜由 A、B 两棱镜共同组成，两者有一对彼此平行的棱面，且其间有约 0.1mm 宽的空气间隙。A、B 两者为一整体，彼此无相对运动。别汉棱镜通过齿轮与取景器目镜联接起来，当取景目镜光轴沿铅垂面旋转时，别汉棱镜也跟着相应转动，只是别汉棱镜的转角为取景目镜转角的二分之一。该别汉棱镜的作用是当取景目镜绕水平轴（图 1—14 中 Z_2 轴）沿铅垂面旋转时，能保证取景

器中的影像始终呈铅垂状态，从而便于摄影者将电影摄影机放置地面上或高举过头顶，进行低角度或高角度摄影而被摄影像始终呈正立状态。别汉棱镜的工作原理如图 1—14 所示。

此外，在分光取景式电影摄影机与三枪式或 3CCD 式彩色电视摄影机上，还经常采用分光棱镜。分光棱镜是一种在某一棱面上镀有分光膜层（即半透射半反射膜层）的棱镜，该分光膜除可使部分光线透过外，还可反射其余部分光线，使之转折一定角度。

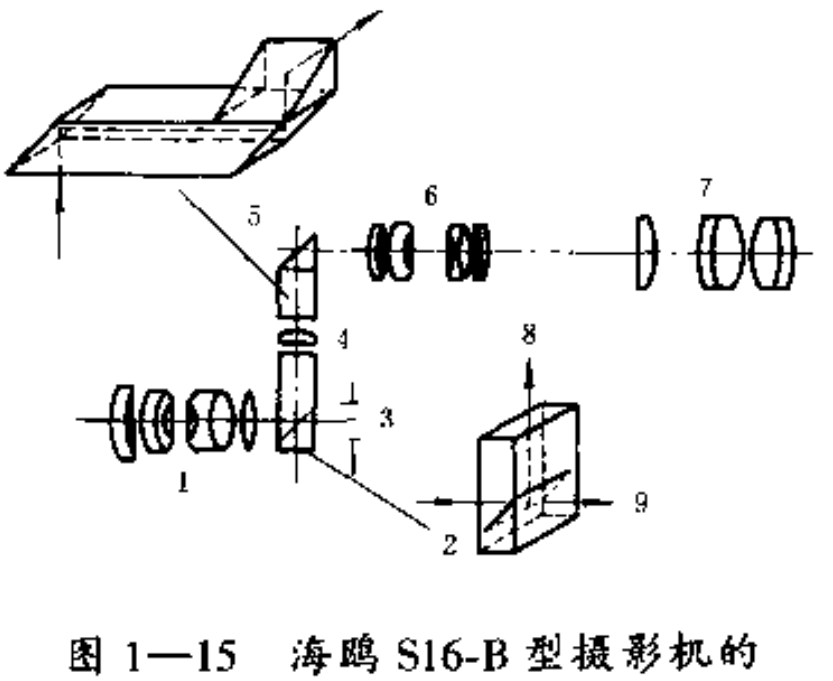
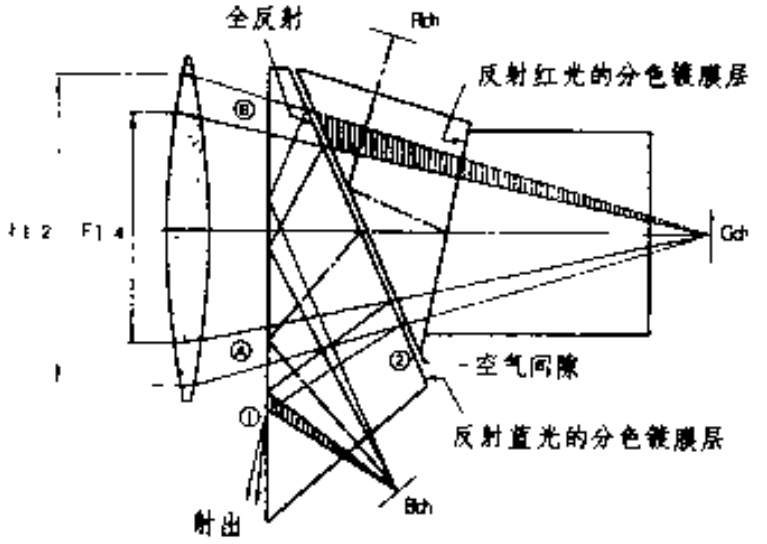


图 1—15　海鸥 S16-B 型摄影机的
摄影与取景光路

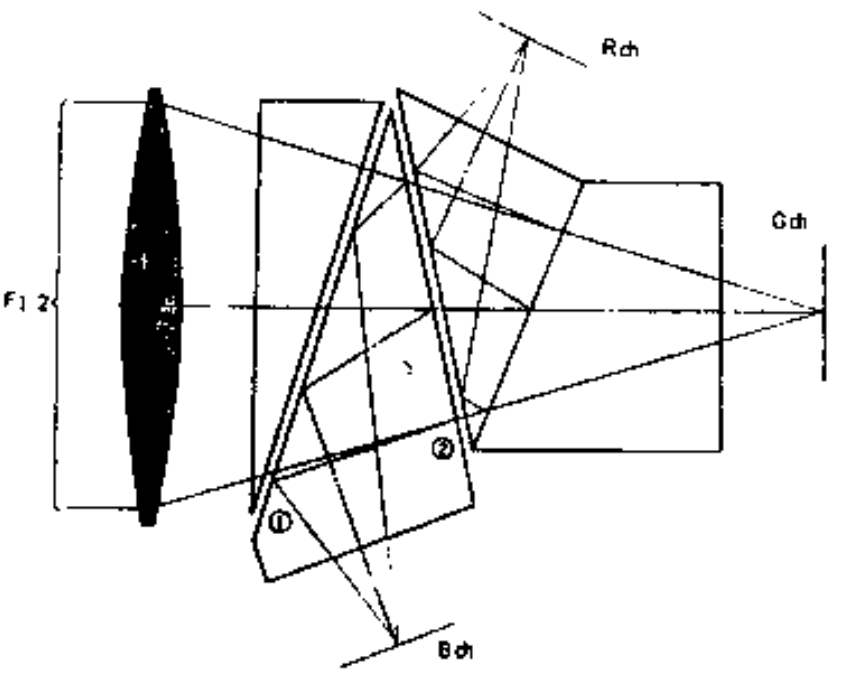
图 1—15 中所示为国产海鸥 S-16B 型电影摄影机的摄影与取景光路。该光路中的分光棱镜 2 除可使摄影镜头 1 会聚来之光线的 60%直接透过，并投射到感光胶片处外，还可使其余 40%光线转折 90°，投射到取景器中，以供摄影者取景。

在彩色电视摄像机上应用最多的是三色分光棱镜。该三色分光棱镜的作用主要是将摄影镜头会聚来的光线，分解为蓝、红、绿三种光线，并分别在蓝、红、绿三个摄像管（或 CCD 器件）上，会聚成相应的三个蓝、红、绿影像。图 1—16a 中所示为普通三片式三色分光棱镜的工作原理，图 1—16b 中所示为新型四片式三色分光棱镜的工作原理。显然，四片式三色分光棱镜可获

得较大的相对孔径。



a.三片式



b.四片式

图 1—16 彩色电视摄像机用
三色分光棱镜

在双筒望远镜的设计中，为了既获得正立的影像，又尽可能缩小望远镜的体积，一般在光路中都设有起倒像作用的棱镜组。

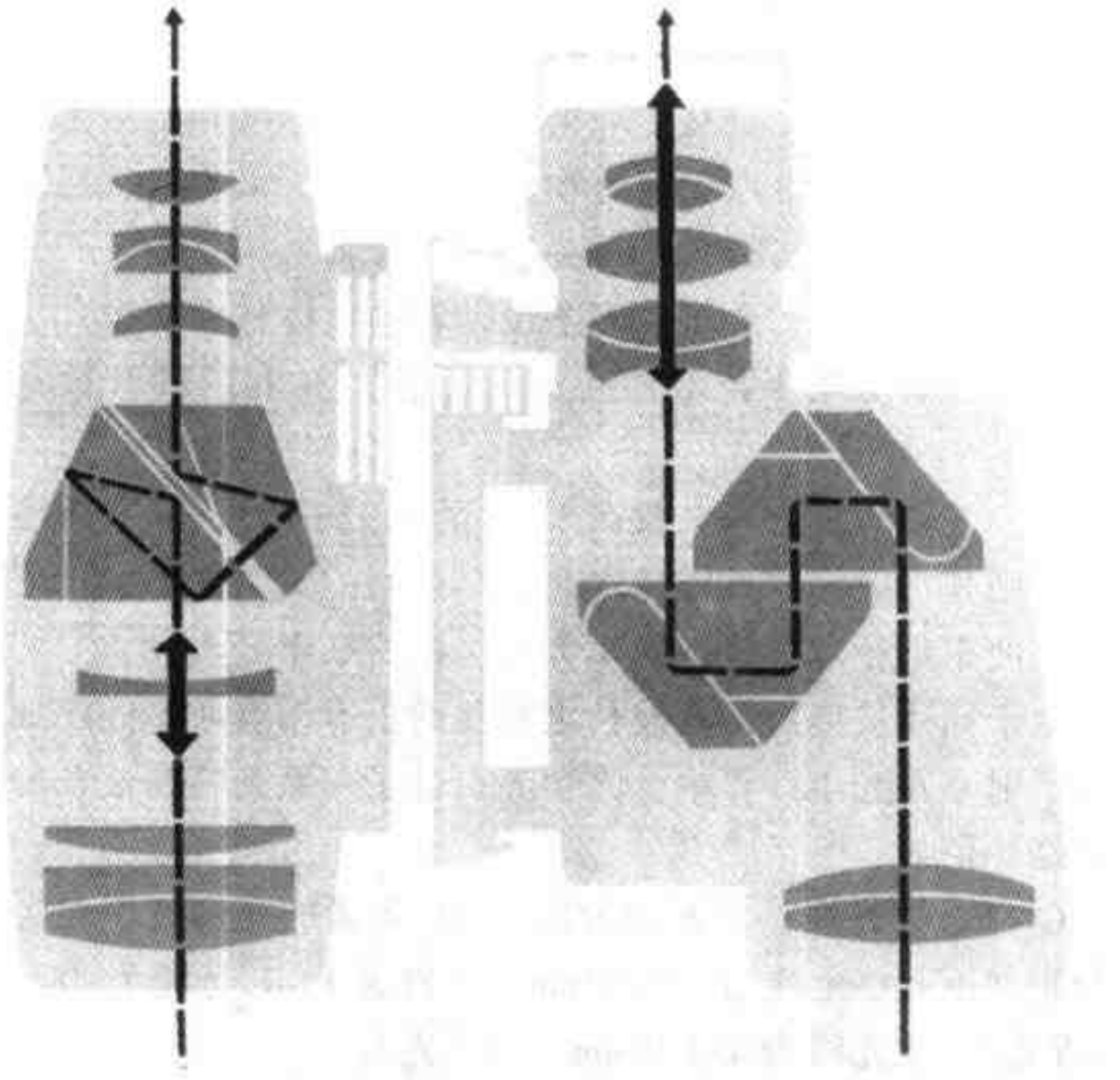


图 1—17　望远镜中的倒像棱镜

图 1—17 中左右两图均为引入倒像棱镜组的望远镜光路图。右图为引入“波罗（Porro）”棱镜组的传统双筒望远镜的光路图，左图为德国莱兹公司生产的新型莱卡（LEICA）双筒望远镜的光路图。由于后者用别汉棱镜取代了传统的波罗棱镜，从而使双筒望远镜的体积显得更加小巧玲珑了。

八、光 学 玻 璃

光学玻璃主要由硅（Si）的氧化物与硼（B）、铅（Pb）、钾

(K)、钡（Ba)、镧（La）等的氧化物，按一定精确比例熔融后均匀混合而制成的。常见光学玻璃约有200余种。

近年光学材料厂家从环境保护角度出发，已开始由无害物质如氧化钛、氧化锑等取代有害物质氧化铅、三氧化砷，同时还使光学玻璃的均匀性与折射率得到进一步改善。

光学玻璃的种类愈多，光学设计者的设计自由度愈大。

光学玻璃的主要技术性能有：折射率 n 和阿贝常数（Abbe Constant）ν。

光学玻璃的折射率一般在1.44至1.92之间。若令透镜焦距不变，则其折射率与该透镜之曲率半径间的关系如下：折射率愈低，则曲率半径愈小；折射率愈高，则曲率半径愈大。

由于同一玻璃对不同波长之光线的折射率有所不同，故此在论述折射率及光学计算中，光学界引进了一系列特殊波长的光线为依据。例如：

C、F、G′光线：三者均为氢（H）元素的光谱线，三者的波长分别如下：C光线为656.27nm（为红光)、F光线为486.13nm（为青光)、G′光线为434.05nm（为蓝光)。

b、D光线：二者均为钠（Na）元素的光谱线，二者的波长依次如下：b光线为709.52nm（为红光)、D光线为589.29nm（为黄光)。

r、d光线：二者均为氦（He）元素的光谱线，二者的波长依次如下：r光线为706.52nm（为红光)、d光线为587.56nm（为黄光)。

e、g、h光线：三者均为汞（Hg）元素的光谱线，三者的波长依次为：e光线为546.07nm（为绿光)、g光线为435.83nm（为蓝光)、h光线为404.66nm（为紫光)。

A′光线：为钾（K）元素的光谱线，其波长为768.20nm（为红光)。

参见表 1—3 所示。

表 1—3　　常见化学元素的光谱线及其相应波长

波长/nm	光谱线代号	化学元素
404.66	h	Hg
434.05	G′	H
435.83	g	Hg
479.99	F′	Cd
486.13	F	H
546.07	e	Hg
587.56	d	He
589.29	D	Na
632.8	He + Ne	
643.85	c′	Cd
656.27	C	H
706.52	r	He
709.52	b	Na
768.20	A′	K

阿贝常数 ν 的计算公式如下：

$$\nu = (n_D - 1) / (n_F - n_C) \qquad (1—4)$$

式中 n_D 为该玻璃对 D 光线的折射率

n_F 为该玻璃对 F 光线的折射率

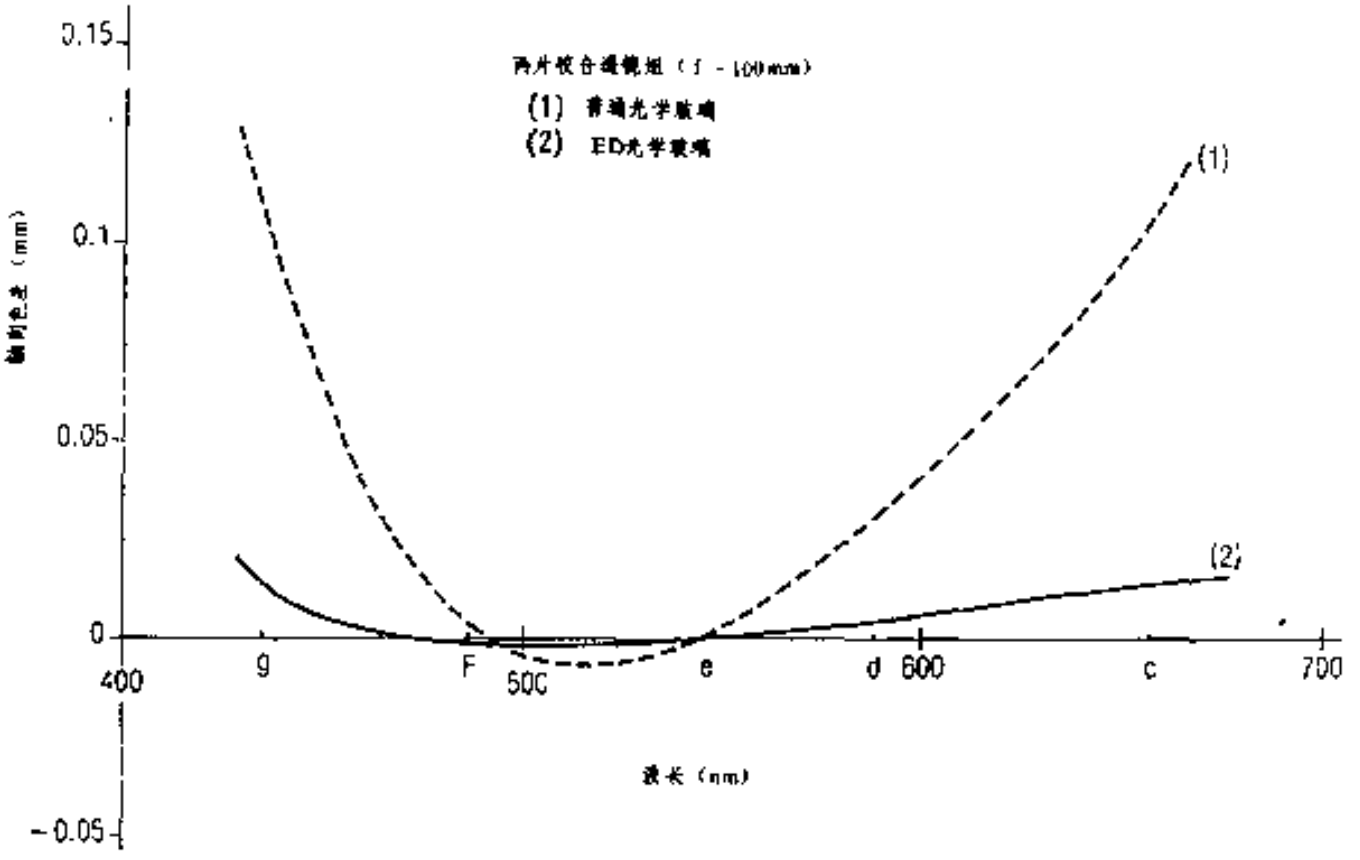
n_C 为该玻璃对 C 光线的折射率。

$(n_F - n_C)$ 又称该光学玻璃的中部色散。

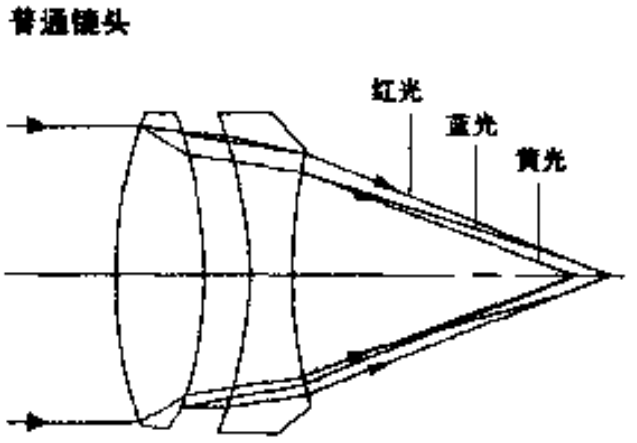
也有人以 n_d（（玻璃对 d 光线的折射率）取代公式（1—4）中的 n_D，计算阿贝常数 ν_d。

显然，对于不同类型的光学玻璃，其阿贝常数一般不相同。

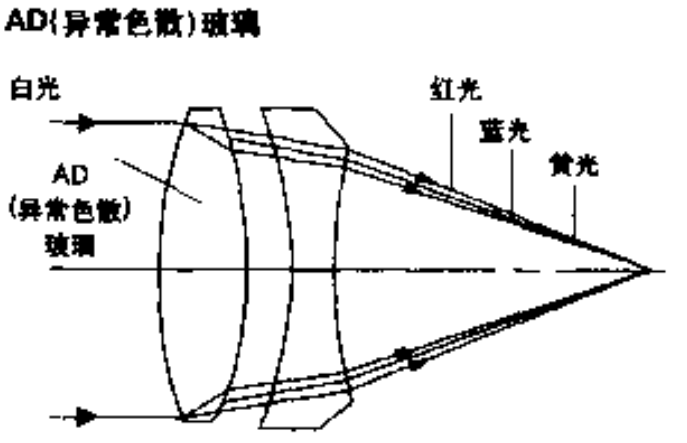
阿贝常数与摄影镜头的色差校正紧密相关。若把具有不同阿贝常数 ν 的正（会聚）透镜与负（发散）透镜组合在一起，则后一透镜可抵消前一透镜产生的色散现象——使已分解的色光又重



a.



b.



c.

图 1—18 光学玻璃的轴向色差对比

新会聚起来。参见图 3—34 中所示。

图 1—18a 中所示为由两片透镜胶合而成之透镜组的轴向色差曲线。显然，普通光学玻璃的轴向色差远较新型低色散光学玻

璃（ED）的大。

表1—4中为常见进口光学玻璃的种类、代号及技术性能。表中字母F（Flint）为火石玻璃，K（Kron）为冕玻璃，S（Schwer）表示重，L（Leicht）表示轻。

表1—4　　常见进口光学玻璃及其代号

种　类	代　号	实　例			
		型　号	折射率 n_d	阿贝常数 ν_d	主要成份（按含量多少排列）
重火石玻璃	SF	SF6	1.80518	25.43	PbO，SiO_2，K_2O
火石玻璃	F	F_2	1.62004	36.37	SiO_2，PbO，K_2O
轻火石玻璃	LF	LF1	1.57309	42.58	SiO_2，PbO，K_2O
镧火石玻璃	LaF	LaF_2	1.74400	44.77	B_2O_3，La_2O_3，PbO
钡火石玻璃	BaF	BaF10	1.67003	47.11	BaO，SiO_2，B_2O_3
库路茨火石玻璃	KzF	KzF1	1.55115	49.68	SiO_2，Sb_2O_3，B_2O_3，K_2O
镧冕玻璃	LaK	LaK10	1.72000	50.41	B_2O_3，La_2O_3，CaO
钡冕玻璃	BaK	BaK1	1.57250	57.55	SiO_2，BaO，ZnO
重冕玻璃	SK	SK16	1.62041	60.33	BaO，SiO_2，B_2O_3
硼硅冕玻璃	BK	BK7	1.51680	64.17	SiO_2，B_2O_3，Na_2O，K_2O

一般而言，冕玻璃的特点为折射率低、色散也低，而火石玻璃的特点为折射率高、色散也高。目前随着光学玻璃工业的日益发展，一系列高折射率低色散玻璃与低折射率高色散玻璃在不断问世，为光学设计界提供了更为广阔的选择余地。

我国国内对光学玻璃的分类与代号规定如表1—5所示。

近年来，色散极小的萤石（Fluorite、为氟化物、即 CaF_2）开始用作光学材料。虽然萤石是一种极好的消色差材料，但因无色

透明萤石的质地非常脆弱，其折射率的大小对温度的变化非常敏感而易导致产生偏差，加工很困难，成本昂贵，故限制了它的广泛应用。目前，国外一些光学公司纷纷研制人工萤石材料及一系列低色散的光学玻璃。例如尼康公司与潘太克斯公司的 ED（Extra Low Dispersion）玻璃、佳能公司的 UD（Ultra-low Dispersion）玻璃、腾龙公司的 LD 玻璃、适马公司的 SLD 玻璃等。

表 1—5　　常见国产光学玻璃及其代号

种　类	代号	实　例	种　类	代号	实　例
轻冕玻璃	QK	$QK_1 \sim QK_3$	轻火石玻璃	QF	$QF_1 \sim QF_5$
冕玻璃	K	$K_1 \sim K_{12}$	火石玻璃	F	$F_1 \sim F_7$
磷冕玻璃	PK	PK_1、PK_2	钡火石玻璃	BaF	$BaF_1 \sim BaF_4$
钡冕玻璃	BaK	$BaK_1 \sim BaK_5$	重钡火石玻璃	ZBaF	$ZBaF_1 \sim ZBaF_7$
重冕玻璃	ZK	$ZK_1 \sim ZK_{12}$	重火石玻璃	ZF	$ZF_1 \sim ZF_7$
镧冕玻璃	LaK	$LaK_1 \sim LaK_5$	特重火石玻璃	TF	$TF_1 \sim TF_3$
冕火石玻璃	KF	$KF_1 \sim KF_3$			

近年日本美能达、腾龙公司先后推出了“异常色散”玻璃 AD（Anomalous Dispersion），该玻璃仍属低色散性质的玻璃，只是其对部分色光（如黄、绿色光）的色散较其它色光（如红、蓝色光）略为异常（略大点），以求改善变焦距镜头长焦距端的轴向色差及短焦距端的倍率色差，参见图 1－18b．c．所示。

由于低色散光学玻璃一般硬度较低、材质较软，容易被划伤，故多采用在摄影镜头内部的透镜上。日本尼柯 ED300mm F2 S（IF）摄影镜头由于第一片透镜采用了 ED 玻璃、为防止其被划伤，设计者特意在该透镜前方增设了一片内装保护玻璃。

在一些廉价摄影镜头上，近年来常常选用无色透明光学塑料作为透镜材料。虽然光学塑料能够通过注塑成型工艺制成，生产

率高、成本低、重量轻，但因其受聚合过程影响而折射率的均匀性略差（由于在聚合过程中所生成之分子团的大小对其折射率高低影响较大，其中分子团愈大者折射率愈高，故此较难把光学塑料的光学性质控制在折射率 $n = \pm 0.0005$ 的高精度上），且因其对温度变化特别敏感（即具有较大的温度折射率系数 dn/dT），折射率低、种类也较少、硬度低、易被划伤、有吸湿性、易因静电而吸尘，故应用尚不广泛。

柯达公司生产的三组三片式 F8 镜头，就是用聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA、俗称有机玻璃）和丙烯腈—苯乙烯共聚物两种光学塑料，分别取代冕玻璃和火石玻璃的。常见光学塑料还有聚苯乙烯（PS）、聚碳酸酯（PC）等。

第二节　薄透镜的成像

一、透　镜

两侧面皆为球面的透明体，或一侧面为球面，另一侧面为平面或非球面[①] 的透明体，称为**透镜**。经过透镜两球面中心的直线，或通过透镜的一个球面中心，并垂直于透镜另一平面的直线，称为该透镜的**光轴**（又称主轴）。透镜的光轴一般用点划线——·——·——表示。光轴与透镜表面的交点称为该透镜的**顶点**。位于透镜左方的称为前顶点，位于透镜右方的称为后顶点。

中央比边缘厚的透镜称为**凸透镜**，又称正透镜。凸透镜一般用图形——·——·——表示。凸透镜对通过它的光线有会聚作用，即有聚光作用，故凸透镜亦称为**会聚透镜**。

中央比边缘薄的透镜称为**凹透镜**，又称负透镜。凹透镜一般

① 为近代出现的以光轴为对称的非球面透镜。

用图形——·—┼—·——表示。凹透镜对通过它的光线有发散作用，故凹透镜亦称**发散透镜**。

常见凸透镜有双凸透镜、平凸透镜、凹凸透镜三种类型。如图 1—19 所示。

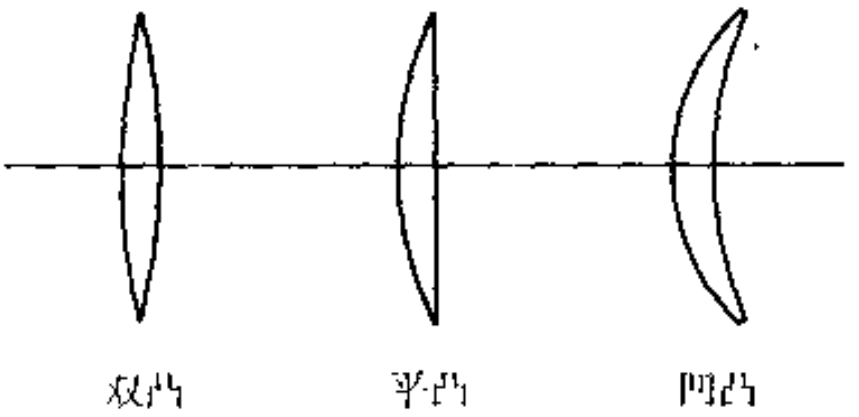


图 1—19 凸透镜的几种类型

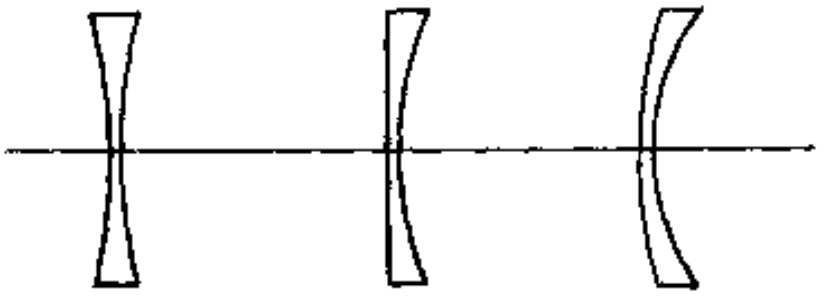


图 1—20 凹透镜的几种类型

常见凹透镜有双凹透镜、平凹透镜、凸凹透镜三种类型。如图 1—20 所示。

透镜可视为顶角连续变化的棱镜。

二、薄透镜及其成像

沿光轴上的厚度远小于两球面半径的透镜，称为**薄透镜**。沿光轴方向度量的薄透镜中点，称为该薄透镜的**光心**。光心一般用

O 表示。

一束平行于光轴的光线通过薄透镜后，经过折射，会聚于光轴上的某一点，或好象自光轴上某一点发散而来，该会聚点或发散点，称为此薄透镜的**焦点**。位于凸透镜左方（或凹透镜右方）的焦点，称为该凸（或凹）透镜的物方焦点，并由字母 F 表示；位于凸透镜右方（或凹透镜左方）的焦点，称为该凸（或凹）透镜的像方焦点，并用字母 F′表示。光心至焦点的距离，称为该薄透镜的**焦距**。光心至物方焦点的距离称为薄透镜的物方焦距，用字母 f 表示；光心至像方焦点的距离称为薄透镜的像方焦距，用字母 f' 表示。自光心至薄透镜左方被摄物体之间的距离称为物距，用字母 l 表示；自光心至薄透镜所成影像之间的距离称为像距，用字母 l' 表示。

显然，薄透镜的轴向最大厚度远小于该透镜的焦距。即薄透镜是一种厚度可忽略不计的透镜。

由实验可知，薄透镜在成像时具有以下规律：

1. 与光轴平行的光线自左方，向右经过凸（或凹）透镜折射后，通过像方焦点 F′（或好似来自像方焦点 F′）。

2. 自左方射向物方焦点 F 的光线，经过凸（或凹）透镜折射后，沿与光轴平行的方向向右前进。

3. 射向光心的光线，经过薄透镜后，其方向不变。

根据薄透镜的上述成像规律，可作出薄透镜对被摄物体的成像图。

图 1—21 所示为位于物方焦点 F 左方的被摄物体 AB，经薄凸透镜的成像图。图中 A′B′为物体 AB 的影像。由于 A′B′为光线实际会聚后所结成的实实在在的影像，故称为**实像**。若在该实像处放置一屏幕，则实像就可在屏幕上显示出来，实像可通过感光材料记录下来。

图 1—22 所示为位于像方焦点 F′左方的被摄物体 AB，经薄

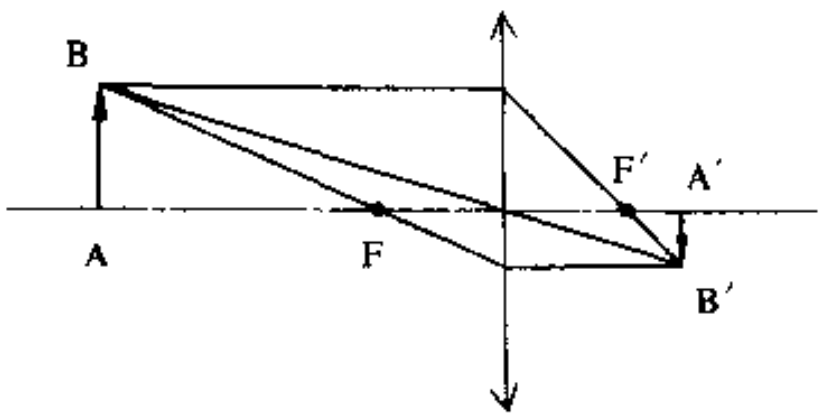


图 1—21 薄凸透镜的成像图

凹透镜的成像图。图中 A′B′为物体 AB 的影像。由于 A′B′并非光线实际会聚后所结成的影像，而是人眼自凹透镜右方观察时的感觉，故称为**虚像**。凡虚像均不能借助屏幕直接显示出来，也无法直接通过感光材料记录下来。虚像是人眼所感觉到的而客观并不存在的影像。

日常生活中的放大镜即为凸透镜，其放大原理如图 1—23 所示。凸透镜作放大镜用时，被观察物体 AB 应位于该凸透镜物方焦点与凸透镜之间。

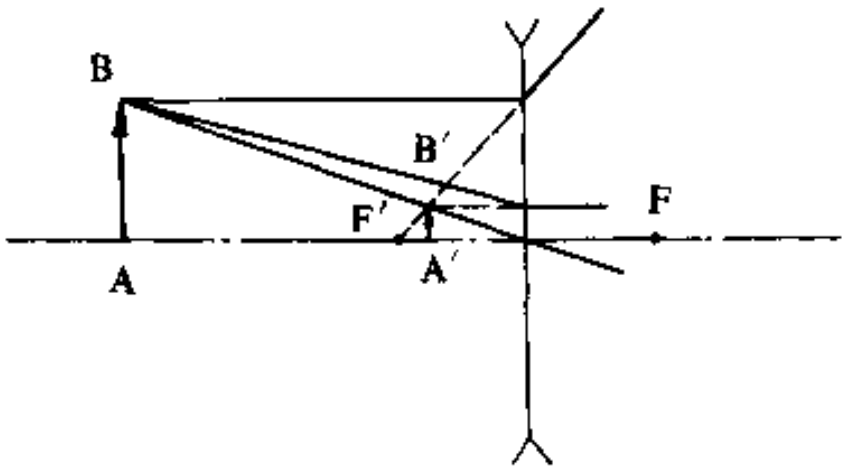


图 1—22 薄凹透镜的成像图

物体（包括虚物）所在空间称为物空间，影像（包括虚像）所在空间称为像空间。二空间均可无限扩展，故不能简单化地把光学系统前方和后方分别称为物空间和像空间。譬如，当凸透镜

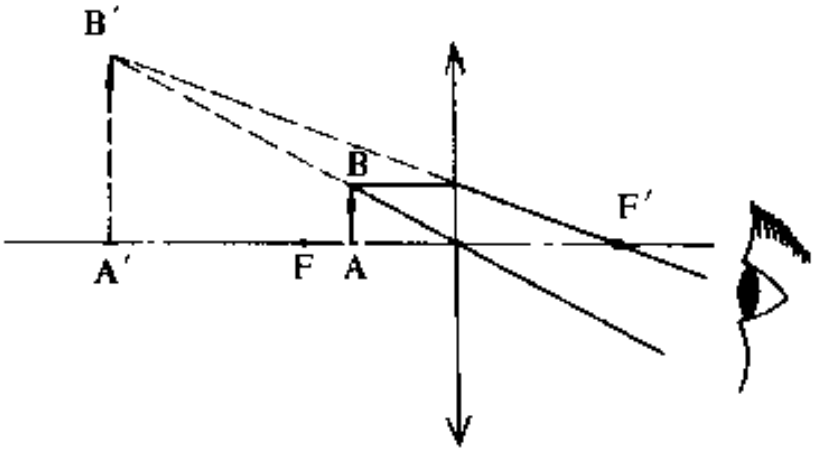


图 1—23　放大镜的成像

作放大镜使用时，物空间与像空间均在该凸透镜的前方。

三、透镜的折光本领与屈光度

球面半径的倒数称为曲率。

透镜会聚或发散光线的能力称为**折光本领**，又称**光焦度**，用字母 φ 表示。**折光本领**与透镜材料的折射率紧密相关，同时还与该透镜两表面的曲率半径大小和曲率中心的方位有关。而透镜的折射率与曲率半径大小，以及曲率中心的方位，又共同决定着该透镜的焦距大小。

透镜的折光本领 φ 与该透镜焦距 f' 之间的关系如下：

$$\varphi = \frac{1}{f'} \tag{1—5}$$

式中焦距 f' 的单位为米，

折光本领 φ 的单位为**屈光度**（*diopter*、*dpt*，又称焦度）。

凸透镜的折光本领为正屈光度（数字前加 + 号），凹透镜的折光本领为负屈光度（数字前加 - 号）。例如，+5 屈光度的透镜为凸透镜，其焦距为

$$f' = \frac{1}{\varphi}$$

$$= \frac{1}{5}\ (米)$$

$$= 200\ (毫米)$$

普通透镜片（如眼镜片）上所标示的度数，系指该透镜片加光度值的一百倍。这样标示可有利于对透镜片进行更精细的分类。例如－200°的眼睛片，系指焦距为500毫米的凹透镜片，可供近视患者佩戴。

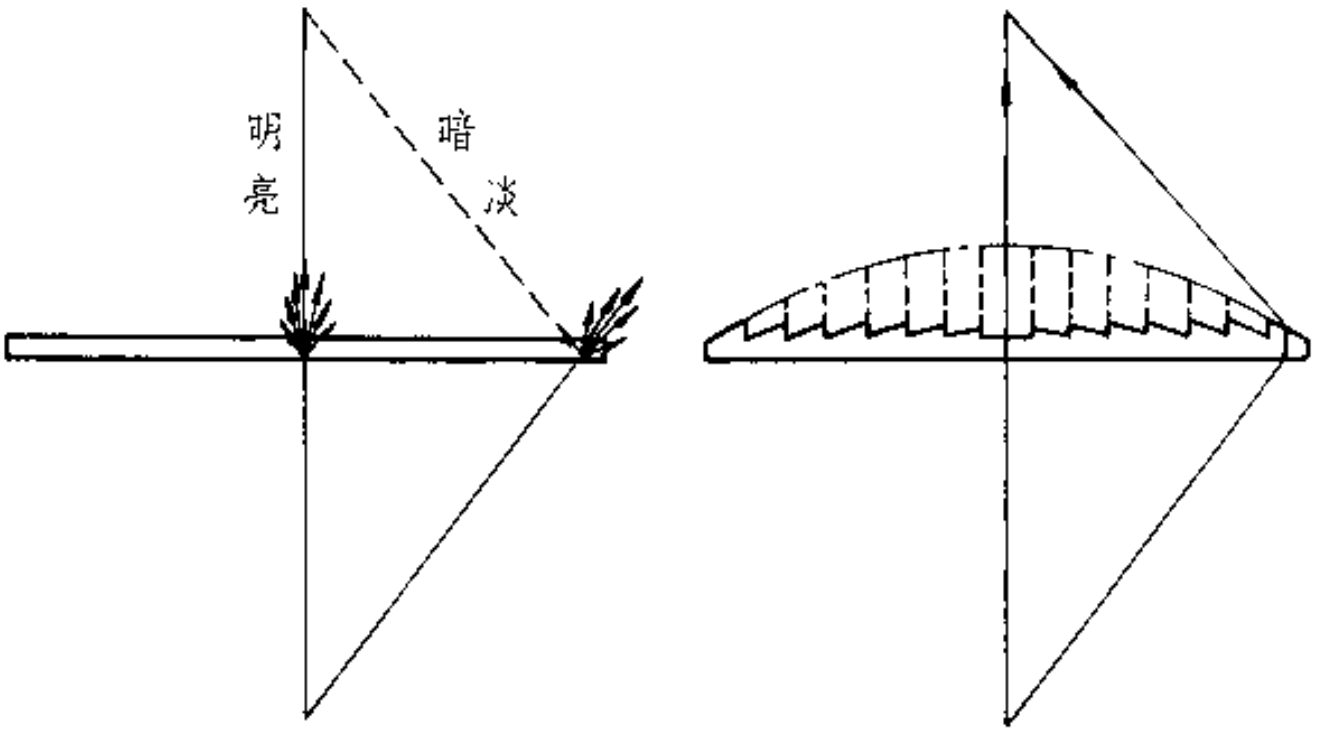
现代电影摄影机的取景器目镜处均有屈光度调节机构，其调节范围一般为－5～＋5屈光度。此调节机构可使佩戴不大于500度近视镜与不大于500度老花镜的摄影者，在不戴眼镜的时候也能清晰进行取景、观看。

有些高档专业照相机的取景器目镜处，也设有与上述类似的屈光度调节机构。

四、特殊的透镜

环带透镜又称菲涅尔（Fresnel）透镜，其结构为将平凸透镜的凸面沿光轴方向其平面压缩，使之成为由一系列由同心圆环构成的台阶状凸面特殊薄镜片。此环带透镜既具有平凸透镜的相应会聚作用，结构又非常薄而轻。环带透镜在摄影设备中应用非常广泛。例如，135单镜头反光照相机取景器的调焦屏（用普通磨砂玻璃作调焦屏取景时，视场边缘的影像将较暗淡，而用环带透镜作调焦屏取景时，视场边缘的影像亮度将得到明显改善，参见图1—24中所示），以及摄影聚光灯的聚光透镜等，为了既使光线产生会聚作用，又减少光学透镜的厚度，缩减光路尺寸，在光学结构上就采用了环带透镜。环带透镜的形状参见图1—24b中所示。

佳能公司近期根据环带透镜的聚光原理，利用光栅技术，加工出对光线具有会聚功能，并按同心圆排列的凸球面衍射光栅。



a.磨砂玻璃　　b.环带透镜

图 1—24　环带透镜

在摄影光路中采用单层凸球面衍射光栅，虽可减轻、减少摄影镜头重量与长度，但该单层凸球面衍射光栅在成像时所产生之衍射光，最终将以眩光的形式投射到像平面上，从而将明显降低光学系统的成像质量。为此，佳能公司又加工出表面形状与前者凹凸完全相对应的凹球面衍射光栅。当把上述一凹一凸的两片球面衍射光栅，凹凸表面相对应地前后叠加在一起时，二者各自产生的衍射光将彼此完全抵消，于是就构成了一种既具有会聚作用，又可完全消除衍射光以免产生眩光的特殊光学元件。将上述由一对球面衍射光栅组成的特殊光学元件，设置在两片彼此胶合的透镜片之间，则所组成的新型会聚透镜组，佳能公司称为**多层衍射光学镜组**（Multi－Layer Diffactive Optical Element）。当然，此项技术系借助微米级（1/1000 毫米级）精度的超精密加工技术才得以实现的。

已知光栅可以导致色散，故此起会聚作用的多层衍射光学镜

组的最大特点是：它可以产生与普通凸透镜完全相反的轴向色差——红光的焦距反而最短、蓝光的焦距却最长。这种独特的色差性能，使得该多层衍射光学镜组可以自动校正传统摄影镜头中所残存的轴向色差，明显地提高了摄影镜头的分辨率与影像反差，从而显著提高了摄影镜头的成像质量；同时，多层衍射光学镜组又可明显减少摄影镜头的长度与重量。

佳能 EF400mm F4 DO IS USM 摄影镜头即为采用了多层衍射光学镜组技术的小巧玲珑的新颖摄影镜头，其长度约为传统 EF400mm F4 USM 摄影镜头的 74%，重量约为传统 EF400mm F4 USM 摄影镜头的 64%，而成像质量却又明显得到提高。

变迹法（APODIZATION）特殊光学元件相当于一片中心渐变密度滤光镜，它可使过元件中央部位的光线顺利通过，而使过元件边缘的光线适当减弱，且愈靠近元件边缘的光线透过的愈少。

日本美能达公司生产的 STF（柔性传递光圈）摄影镜头即为采用了内置变迹法特殊光学元件的摄影镜头。

内置了变迹法光学组件的摄影镜头，可使被调焦物平面前后之光点在胶片平面处所形成的光斑的形状，呈现为中央明亮，周缘愈来愈暗、愈来愈模糊、朦胧的独特光斑，而不再是亮度均匀的圆光斑。从而使被调焦主体景深之外的景物，在画上所形成的影像轮廓呈现为柔和、圆润、淡雅、朦胧的独特影调效果，同时使所摄画面呈现出更为自然，且立体感更为强烈，具有细微凸凹层次感与鲜明质感，周边柔性虚化的绚丽视觉效果。

思 考 题

1. 人眼有哪些适应？人眼各视场的特点及人眼分辨景物细节的特点如何？

2. 光线的传播定律与偏振光的特点如何？

3. 何谓屈光度？透镜片度数的意义？

第二章　摄影镜头成像的基本原理

第一节　摄影镜头的成像

摄影镜头的光学系统一般是由若干“组”共轴而又彼此有空气间隙的透镜所组成（甚至含有反光镜）。每组透镜可能是一个单片透镜，也可能是由两片或两片以上单片透镜互相胶合而成。虽然各片透镜或是凸透镜、或是凹透镜，但组成摄影镜头后共同起会聚作用。

由于摄影镜头和厚透镜沿光轴的厚度较大（此轴向厚度与其焦距相比，已不能再予以忽略了），因而不宜再按薄透镜的成像规律，对摄影镜头和厚透镜进行研究。

一、共轴球面理想光学系统

目前，绝大部分光学系统都是供对物体成像的。使用者所希望获得的理想像是，影像与原物体“相象”且成像绝对清晰。

能够获得理想像的光学系统称为理想光学系统。理想光学系统在均匀透明介质中具有下列基本特性。

1. 点成像为点：物空间中的每一个物点各对应着像空间中的一个唯一像点。该两个对应点称为物、像空间的共轭点（共轭指彼此互相对应）。即由同一物点发出的全部光线在通过该光学系统后，仍相交于一点。

2. 直线成像为直线：物空间中的每一条直线各对应着像空

间中的一条唯一直线。该两条对应线称为物、像空间的共轭线。

3. 直线上的点成像于共轭线上：物空间中的任意一点若位于某直线上，则其在像空间中的共轭点必位于该直线的共轭线上。

4. 平面成像为平面：物空间中的每一个平面各对应着像空间中的一个唯一平面。该两个对应平面称为物、像空间的共轭面。

总之，具有上述成像关系的光学系统称为理想光学系统。显然，这类系统没有像差，可使物空间的同心光束在像空间仍为同心光束，并互为共轭。

虽然目前尚无法获得上述理想光学系统，但明确理想光学系统的特性，可为实际光学系统的研究和设计指明目标和方向，以求获得最佳实际光学系统。

若光学系统的全部界面均由球面和平面构成（平面可视为半径无限大的球面），且各球面的球心均位于同一条直线上，则该光学系统称为共轴球面光学系统。连接各球心的直线称为该光学系统的光轴（又称主轴），光轴与球面的交点称为顶点。

共轴球面理想光学系统除具有上述理想光学系统的全部特性外，还具有下述特性：

1. 光学系统本身及物空间与像空间具有同一个对称轴——光轴。因此，物平面垂直于光轴时，其共轭像平面也必垂直于光轴；物点位于光轴上时，其共轭像点也必位于该光轴上；物点位于过光轴的任一截面上时，其共轭像点也必位于该截面上；过光轴的任一截面的成像性质均相同（显然，该共轴球面理想光学系统可用任一过光轴的截面作为代表，因而便于研究）。

2. 凡垂直于光轴的物平面均具有下述特性：同一平面内各部位的影像放大率均相等。因此，当物位于垂直于光轴的同一平面上时，其像与物的几何形状完全相似。

摄影镜头是一种实际光学系统，为了研究其成像性质，比较和评价其成像质量，设计出最佳产品，均需借助于共轴球面理想光学系统的成像特性为依据与标准。

二、光学系统的焦点、节点与主点

从几何光学角度分析，每个摄影镜头都存在几对具有特殊成像性能的基准点，简称基点。这些基点平时既看不见、又摸不到，但在成像时它们又确实存在。而且这几对基点均位于摄影镜头的光轴上。

第一对基点是“**焦点**”。

由于摄影镜头有聚光作用，所以当摄影镜头前端精确朝向太阳时，它可将阳光会聚于该摄影镜头后端光轴上的一点，并可将位于该点处的有机物（如纸张）烤焦，此会聚点称为该摄影镜头的像方焦点，并用 F′表示。同理，若把摄影镜头后端精确朝向太阳时，则该摄影镜头前端光轴上也有一个可把有机物烤焦的会聚点，此点称为该摄影镜头的物方焦点，并用 F 表示。物方焦点和像方焦点统称为焦点。

像方焦点和物方焦点的严格定义如下：自物方（像方）空间距光学系统无限远处之光轴上一点，发出一束光线（或一束与光学系统光轴平行的光线），从前方（后方）射入该光学系统，经折射后，会聚于该光学系统像方（物方）空间光轴上的某一点处，则该会聚点称为此光学系统的像方（物方）焦点。

过物方焦点或像方焦点，并与光轴垂直的平面，分别称为物方焦平面和像方焦平面，两者统称为**焦平面**。

在摄影界，人们还为“焦点”一词赋予了另一种含义——“调焦准确与否所导致的被摄主体之影像的清晰程度”。例如，有些摄影者常常把由于调焦准确而导致的被摄主体之影像清晰的现

象称为“**焦点清晰**”，把由于调焦有误差而导致的被摄之体影像模糊的现象称为“**焦点不实**”、“**焦点虚**”，把针对某沿纵深方向运动之物体的连续跟踪调焦操作称为“**跟焦点**”。

第二对基点是“**节点**”。

我们研究摄影镜头成像时，可以发现这样一个特殊点：自景物发出的光线中，凡是射向摄影镜头光轴上某一点的光线，经该摄影镜头折射后，均沿与入射光线平行的方向射出，光轴上的这一具有特殊性能的点，称为物方节点，并用 N 表示。同时，我们还发现：凡是射向物方节点的光线，在经摄影镜头折射后，所有的出射光线均好象来自该摄影镜头光轴上的另一点，此点称为像方节点，并用 N′表示。物方节点和像方节点统称为节点。

节点的严格定义如：光学系统在成像时，角放大率为正 1（$\gamma = +1$）的一对共轭点，称为节点，其中位于物方（像方）空间的称为物方（像方）节点。

第三对基点是“**主点**”。

当摄影镜头位于空气介质之中时，物方主点（用 H 表示）刚好位于物方节点 N 处，像方主点（用 H′表示）刚好位于像方节点 N′处（若摄影镜头一侧是水、另一侧是空气，则主点与节点将不再彼此重合）。物方主点与像方主点统称为主点。过物方主点或像方主点，且与光轴垂直的平面，分别称为物方主平面和像方主平面，两者统称为**主平面**。

主点的严格定义如下：光学系统在成像时，垂轴放大率为正 1（$m = +1$），且与该光学系统光轴垂直的一对共轭平面，称为主平面。其中位于物方空间（像方空间）的称为物方主平面（像方主平面）。物方主平面和像方主平面各自与光轴的交点，分别称为物方主点和像方主点。物方主点和像方主点统称为主点。

由光学系统物方主点 H 至物方焦点 F 间的距离，称为该光学系统的物方焦距，用 f 表示。自光学系统像方主点 H′至像方

焦点 F′间的距离，称为该光学系统的像方焦距，用 f' 表示。物方焦距 f 和像方焦距 f' 统称为**焦距**。物方焦距与像方焦距间的关系如下：

$$f'/f = -n'/n,$$

式中 n（n'）为物（像）方空间介质的折射率。

由于薄透镜的厚度很薄，所以可近似认为它的两个主点 H 和 H′彼此重合，并用光心 O 表示。对于摄影镜头和厚透镜，由于其厚度较大，以至此厚度与焦距相比已不能再予以忽略，因而不能再把它的两个主点 H 和 H′理解成彼此重合了。

不同类型的厚透镜，其物方主点 H 和像方主点 H′相对该厚透镜前后表面的位置，往往差别很大。参见图 2—1 中所示 8 种形式厚透镜的主平面位置。

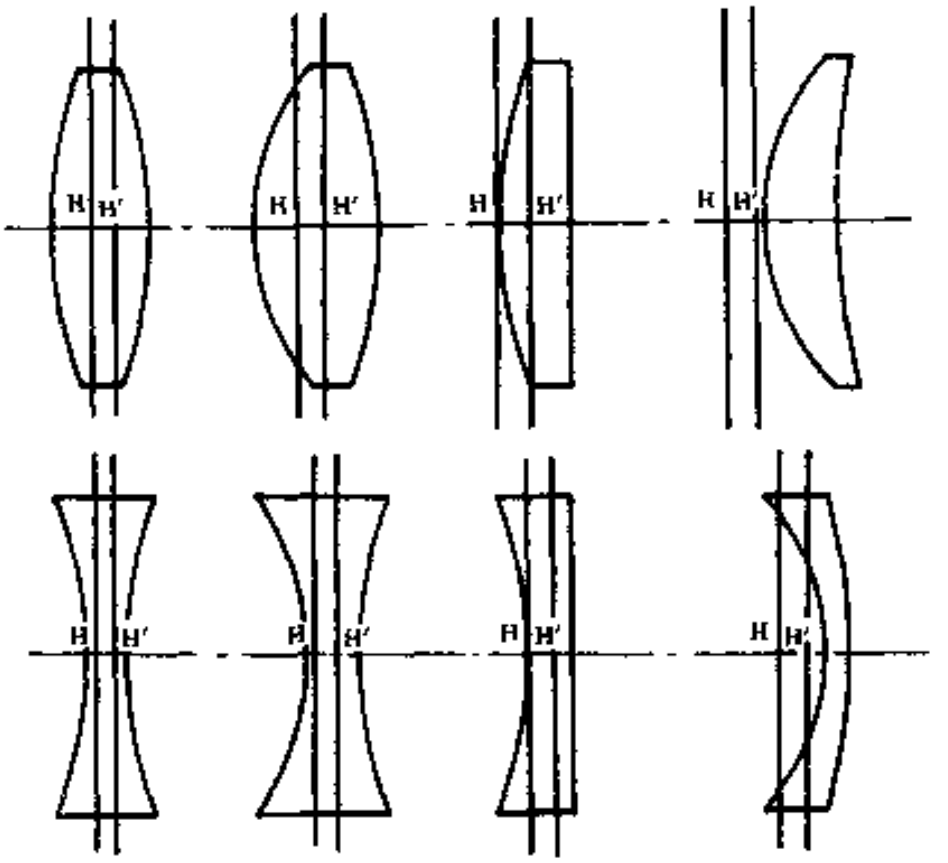


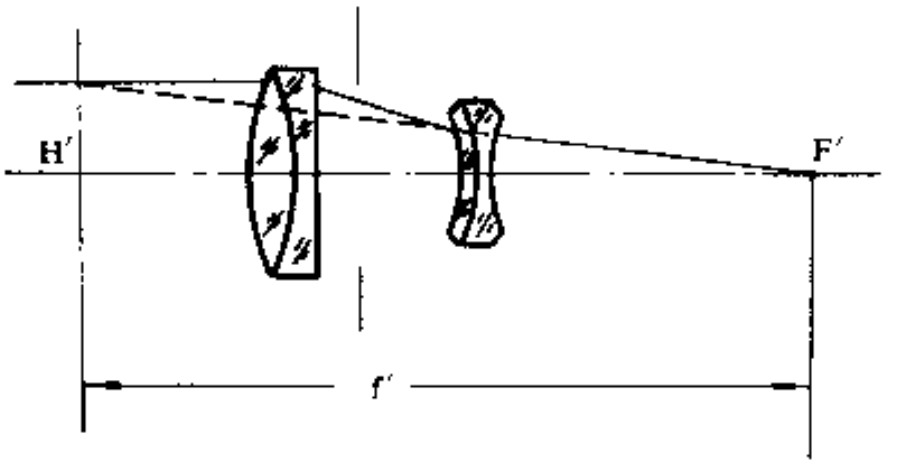
图 2—1　八种厚透镜的主平面位置

不同类型的摄影镜头，其物方主点 H 和像方主点 H′相对镜筒的位置，往往也差别很大：有的位于光圈叶片附近，有的位于

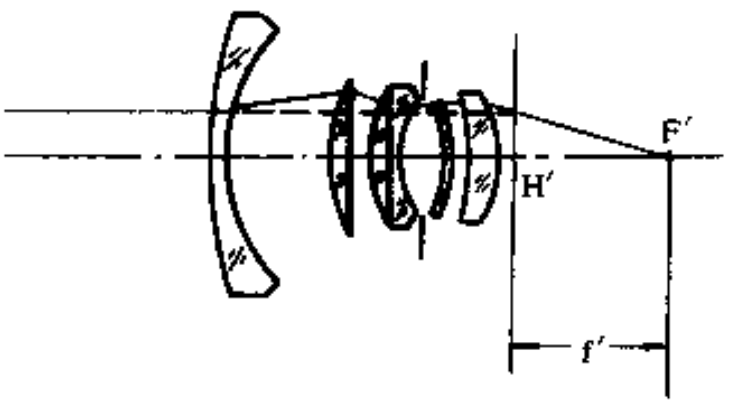
镜筒前部，有的位于镜筒后部，还有的甚至可能位于摄影镜头外部。例如：尼康 F3 型 135 单镜头反光照相机，当安装焦距 8 毫米、1:2.8 的尼柯鱼眼（Fisheye Nikkor）摄影镜头，对无限远调焦时，像方主平面的位置应位于感光胶片平面正前方 8 毫米处。而在 8 毫米厚度内，是无法同时容纳下曝光窗的厚度、焦平面快门的厚度，及成 45°角的反光镜作自由升降的空间厚度（F3 型照相机机身上镜头座定位端面至胶片平面间的距离设计成 46.5 毫米，正是为了在胶片平面与镜头后顶点之间容纳下上述空间厚度）。显然，该鱼眼摄影镜头采用了使像方主点位置，远在该摄影镜头后顶点后方的光学设计。又如，和平牌 S35Ⅱ型 35 毫米电影摄影机，当安装 35SJ-20 型 20mm、1:2（焦距为 20 毫米）的摄影镜头，并对无限远调焦时，像方主平面的位置位于胶片平面正前方 20 毫米处，而该摄影镜头最后一片透镜的后顶点至胶片平面间的距离为 30.04 毫米。显然，此摄影镜头的像方主平面位置，远在该镜头后顶点的后方。

图 2—2 所示为像方主点 H′位于摄影镜头外部的两种摄影镜头。图 2—2a 中所示为长焦距摄影镜头，其像方主点 H′位于该摄影镜头前顶点的前方；图 2—2b 中所示为短焦距摄影镜头，其像方主点 H′位于该摄影镜头后顶点的后方。

在普通摄影镜头上，一般物方主点 H 靠近物体一方（在光学结构图的左方），像方主点 H′靠近影像一方（图中右方）。在不同结构的摄影镜头上，物方主点 H 与像方主点 H′之间的距离 a，一般并不相等。也有些摄影镜头的物方主点 H 与像方主点 H′前后位置颠倒，即 H 位于靠近影像的一侧（图中右方），H′反而位于靠近物体一侧（图中左方）。显然，此时的间距 a 为负值。图 2—3a 为尼柯 Q-AUTO 400 毫米、1:4.5 长焦距摄影镜头的光学结构图。从图中可知，H 反而位于 H′右方、更靠近感光胶片，H 与 H′的间距为 - 107.7 毫米。



a.摄远型镜头

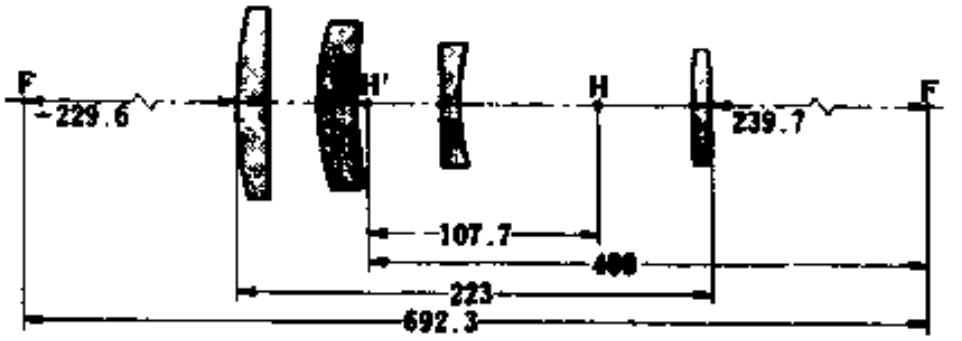


b.反摄远型镜头

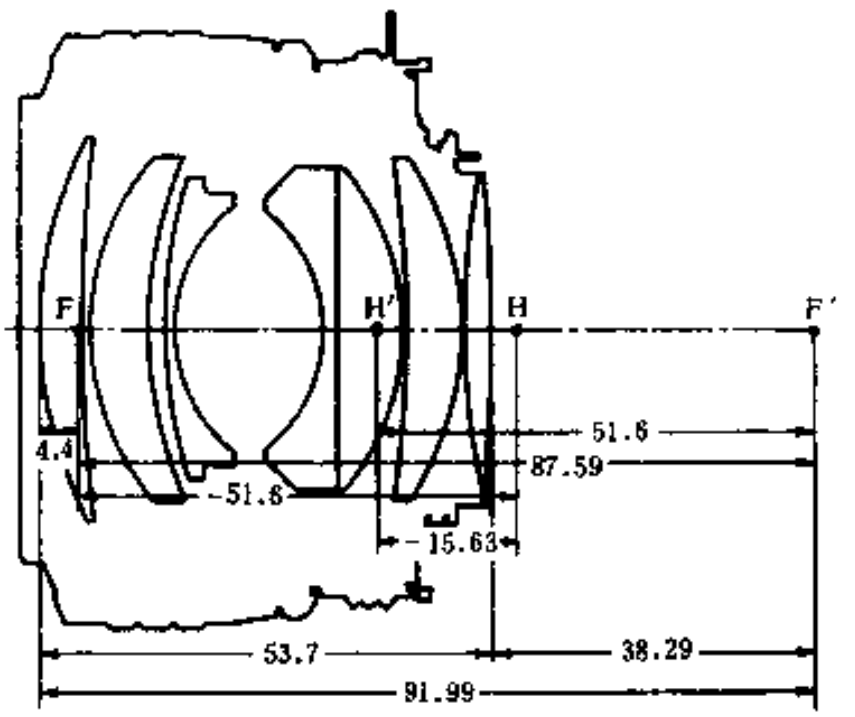
图 2—2

在普通摄影镜头上，一般物方焦点 F 位于摄影镜头前顶点的前方，但也有少数摄影镜头的物方焦点 F 位于摄影镜头的内部。图 2—3b 所示为尼柯 50 毫米、1:1.2 摄影镜头，从图中可知，该镜头物方焦点反而位于镜头前顶点的后方 4.4 毫米处。

还有少数变焦距摄影镜头，当变焦至某一焦距值时，甚至可能出现物方主点 H 后移至该镜头像方焦点 F′的后方。例如，法国昂热尼厄 15 × 变焦距摄影镜头。



a.尼柯 400 毫米镜头



b.尼柯 50 毫米镜头

图 2—3

三、光学系统的成像作图与公式

摄影镜头一般是由若干片透镜组成的共轴球面正组光学系统。在该共轴光学系统中，各透镜的光轴彼此重合。由于光线通过摄影镜头中的每片透镜时，均先后发生两次折射，因此，从被摄景物投射来的光线，在经过摄影镜头时要发生多次折射。显

然，摄影镜头的实际成像光路图非常难作。

在几何光学中，研究共轴球面理想光学系统的整体成像性能时，往往可略去该光学系统的实际结构，而将其近似看作一厚透镜，以便简化作图和计算。此厚透镜的前表面和后表面，分别表示该光学系统第一片透镜的前表面和最后一片透镜的后表面。

一束与共轴球面正组理想光学系统光轴平行的光线，从左侧（即物方空间）进入该光学系统，经过各透镜的多次折射后，向该光学系统右侧（即像方空间）射出，并会聚于光轴上的一点，此会聚点即该光学系统的像方焦点 F′。同理，一束平行于光轴的光线，从像方空间经过该光学系统后，将会聚于物方空间光轴上的一点，此会聚点即该光学系统的物方焦点 F。显然，位于物方空间无限远处的点光源，经摄影镜头后，在像方焦平面处成像；位于物方焦平面处的点光源，经摄影镜头后，在像方空间无限远处成像。

自物方空间 B 点发出的与共轴球面正组理想光学系统光轴平行的光线，从该光学系统前表面上的 P 点进入光学系统，经过多次折射后，于光学系统后表面上的 P′点，射向该光学系统的像方焦点 F′。见图 2—4 所示。若把线段 BP 和 F′P′分别延长，则两者相交于 Q′点。过 Q′点作垂直于光学系统光轴的平面（此即该光学系统的像方主平面），此平面与光轴相交于该光学系统的像方主点 H′。为便于分析和作图，一般假设：物方发出的与光学系统光轴平行的光线，在进入该光学系统后，仍沿原方向前进，直至像方主平面处，才发生折射——射向像方焦点 F′。

自像方空间 B′点发出的与共轴球面正组理想光学系统光轴平行的光线，从该光学系统后表面上的 U′点进入光学系统，经过多次折射后，于光学系统前表面上的 U 点，射向该光学系统的物方焦点 F。若将线段 B′U′和 FU 分别延长，则两者彼此相交于 V 点。见图 2—4 所示。过 V 点作垂直于光轴的平面（此即该

光学系统的物方主平面），此平面与光轴相交于该光学系统的物方主点 H。同理，一般假设：自像方空间发出的与光轴平行的光线，在进入光学系统后，仍沿原方向前进，直至物方主平面处，才发生折射——射向物主焦点 F。由于光路的可逆性，因此可以认为：自物方空间发出的过物方焦点 F 的光线，在进入光学系统后，仍沿原方向继续前进，直至物方主平面处，才发生折射——沿与光轴平行的方向，一直向像方空间射出。

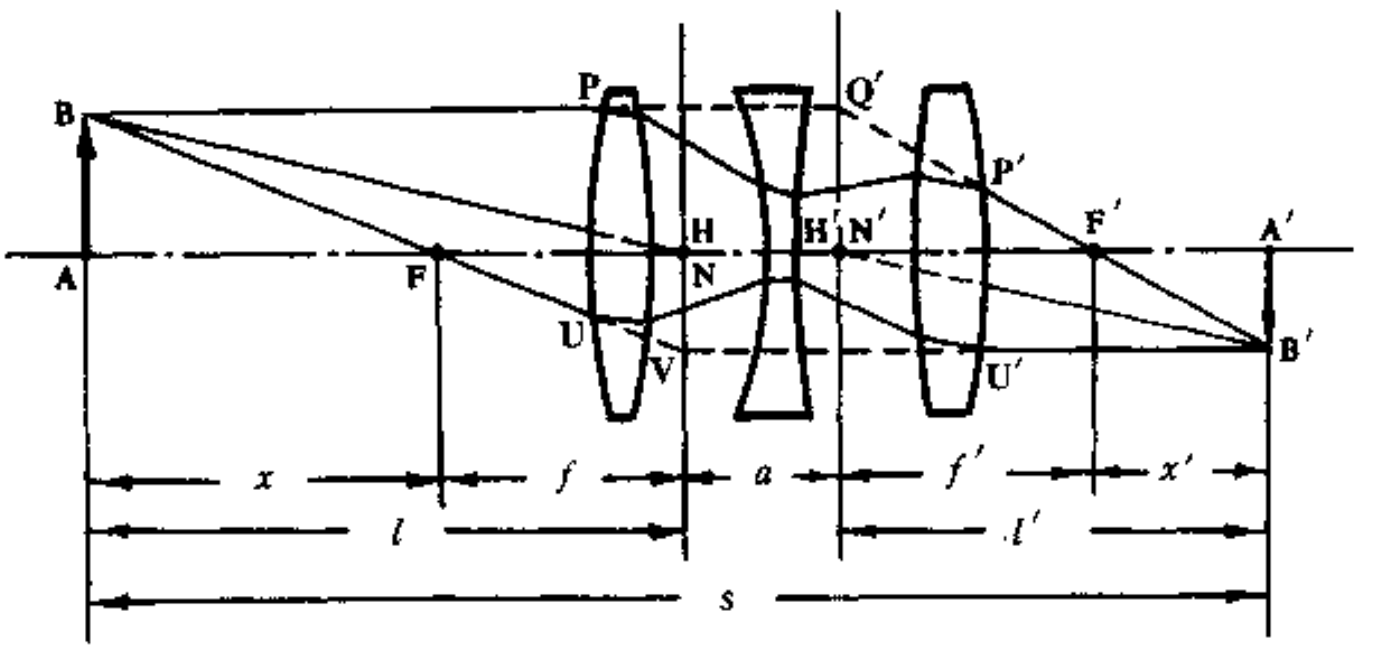


图 2—4　摄影镜头的成像

当光学系统位于空气介质之中时，可以认为：自物点 B 射向物方主点 H 的光线，经折射后，从像方主点 H′沿与入射光线平行的方向，向像方空间射去。见图 2—4 所示。

根据上述三条成像规律中的任意二条，可以求出任意物体 AB 经共轴球面正组理想光学系统后，所结成的清晰影像 A′B′。为了作图方便，我们一般略去光学系统中各透镜片的具体光学结构，仅用光轴、物方与像方主平面、第一片透镜的前表面与最后一片透镜的后表面来表示一个摄影光学系统，如图 2—5 中所示。

由光学系统物方主平面至被摄物平面间的距离 l，称为物

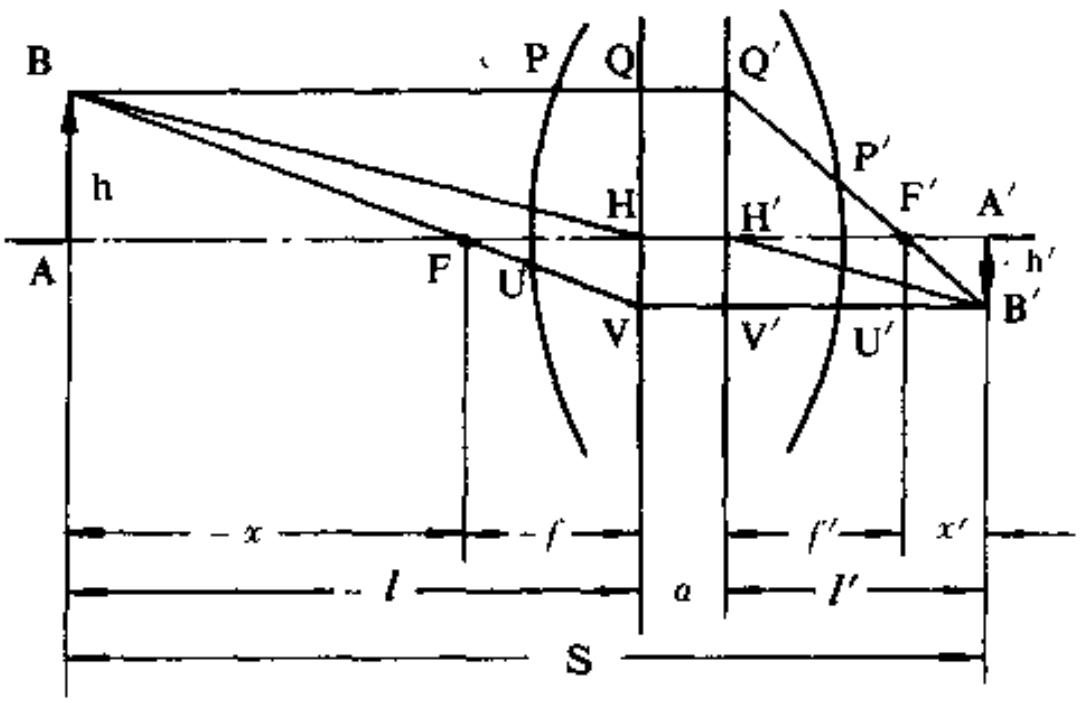


图 2—5　共轴球面正组理想光学系统的成像

距。

自光学系统像方主平面至清晰像平面间的距离 l'，称为**像距**。

自物方焦平面至被摄物平面间的距离 x，称为**焦物距**。

自像方焦平面至清晰像平面间的距离 x'，称为**焦像距**。参见图 2—5 所示，

此外，摄影时被调焦物平面至感光胶片平面之间的距离 S，称为**调焦距离**，又称摄影距离。参见图 2—5 所示。

为了使由光路图推导出的公式具有普遍性，以及为了能根据公式计算出的数值准确判断各点和线段在光路图中的具体方位，在几何光学中，对所有参量均规定了符号规则，即正、负号规则。该规则的前提是，设光线的传播方向为由左向右。

1. 线段符号规则：

首先，规定了各参量（线段）的计量起点和终点；其次，规定若自某参量计量起点向终点度量时，系由左向右、由下向上度量的，则该参量为正值，反之为负值。

各参量的计量起点和终点如下。

球面半径 r：由球面顶点向球心度量（球心在球面顶点右方的 r 为正值，反之为负）；

焦距 f、f'：由主点向焦点度量（凸透镜的像方焦距 f' 为正值、物方焦距 f 为负值，凹透镜则反之）；

物距 l：由物方主点向物度量（实物的 l 为负值）；

像距 l'：由像方主点向像度量（当成实像时 l' 为正值，当成虚像时 l' 为负值）；

焦物距 x：由物方焦点向物度量（当摄影镜头的 $|l|>|f|$ 时 x 为负，当 $|l|<|f|$ 时 x 为正）；

焦像距 x'：由像方焦点向像度量（当成实像时 x' 为正值，成虚像时 x' 为负值）；

物高 h、像高 h'：由光轴向两侧度量（物点或像点在光轴之上方者，其 h、h' 为正值，物点或像点在光轴之下方者，其 h、h' 为负值。

两光学系统的光学间距 Δ：由第一光学系统的像方焦点 F_1' 向第二光学系统的物方焦点 F_2 度量；

两光学系统的主点间距 d：由第一光学系统的像方主点 H_1' 向第二光学系统的物方主点 H_2 度量；

组合光学系统物方焦点与第一光学系统物方焦点的间距 X_F：由第一光学系统物方焦点 F_1 向组合光学系统物方焦点 F 度量；

组合光学系统像方焦点与第二光学系统像方焦点的间距 X_F'：由第二光学系统像方焦点 F_2' 向组合光学系统像方焦点 F′ 度量；

组合光学系统物方主点与第一光学系统物方主点的间距 l_H：由第一光学系统物方主点 H_1 向组合光学系统物方主点 H 度量；

组合光学系统像方主点与第二光学系统像方主点的间距 l_H'：

由第二光学系统像方主点 H_2' 向组合光学系统像方主点 H′度量。

2. 角度符号规则：

角度一律以锐角来度量。当由光轴转向光线、或由光线转向法线、或由光轴转向法线构成该锐角时，是顺时针转的，则该锐角为正值，反之为负值。

根据图 2—5 中所示成像光路图，可以推导出牛顿成像公式

由图 2—5 可知，ΔABF 与 ΔFHV 为相似三角形，且 $HV = A'B' = h'$

$$\therefore \quad \frac{HV}{AB} = \frac{FH}{AF}$$

即

$$\frac{h'}{h} = \frac{f}{x}$$

由图 2—5 还可知，$\Delta A'B'F'$ 与 $\Delta F'H'Q'$ 为相似三角形，且 $Q'H' = AB = h$

$$\therefore \quad \frac{A'B'}{Q'H'} = \frac{A'F'}{F'H'}$$

即

$$\frac{h'}{h} = \frac{x'}{f'}$$

由上述二公式可知

$$\frac{h'}{h} = \frac{x'}{f'} = \frac{f}{x}$$

$$\therefore \quad x\,x' = f\,f' \qquad (2—1a)$$

$$\because \quad f'/f = -n'/n$$

故若光学系统位于空气介质之中

则

$$f' = -f$$

代入（2－1a），则牛顿公式为

$$x\,x' = -f'^2 \qquad (2—1b)$$

由公式（2－1a）可推导出高斯成像公式

$$\because \quad x = l - f \qquad x' = l' - f'$$

代入公式（2－1a）得

$$(l-f)(l'-f') = ff'$$

$$ll' - l'f - lf' + ff' = ff'$$

$$lf' - l'f = ll'$$

等式两侧同除以 ll' 得

$$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1 \qquad (2—2a)$$

若光学系统位于空气介质之中，则高斯公式为

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \qquad (2—2b)$$

对于光学系统的任一对彼此共轭的物平面和像平面，其相应之像高 h' 与物高 h 之比，称为此光学系统针对该物平面成像时的**垂轴放大率** m，俗称**影像放大率**。

根据图 2—5 中所示成像光路图，可推导出影像放大率公式

$$m = h'/h$$

$$= -\frac{f}{x} = -\frac{f}{l-f}$$

$$= -\frac{x'}{f'} = -\frac{l'-f'}{f'}$$

$$= \frac{nl'}{n'l} = -\frac{fl'}{f'l} \qquad (2—3a)$$

若光学系统位于空气介质中，则

$$m = l'/l \qquad (2—3b)$$

由公式（2—2a）、（2—3a）可推导出物距 l 和像距 l' 的计算公式

$$l = \frac{l'f}{l'-f'}$$

$$= f - \frac{f}{m} = f(1-1/m) = f - \frac{hf}{h'}$$

$$= \frac{n\,l'}{n'm} \tag{2—4a}$$

若光学系统位于空气介质中，则

$$l = -\frac{l'f'}{l'-f'} = \frac{l'}{m} \tag{2—4b}$$

$$l' = \frac{l\,f'}{l-f}$$

$$= f' - m\,f' = f'\ (1-m)\ = f' - \frac{h'f'}{h}$$

$$= \frac{n'm\,l}{n} \tag{2—5a}$$

若光学系统位于空气介质中，则

$$l' = -\frac{l\,f}{l-f} = m\,l \tag{2—5b}$$

由公式（2—3a）还可推导出物高 h 和像高 h' 的计算公式

$$h = h'/m$$

$$= -\frac{h'\ (l-f)}{f}$$

$$= -\frac{h'f'}{l'-f'} \tag{2—6a}$$

$$h' = m\,h$$

$$= -\frac{h\ (l'-f')}{f'}$$

$$= -\frac{h\,f}{l-f} \tag{2—7a}$$

由公式（2—3a）可推导出焦像距的计算公式

$$x' = -f'm \tag{2—8a}$$

由于摄影镜头为正组光学系统，摄影时光学系统位于空气介质之中，所成影像为实像，故上述公式（2—1a）至（2—7a）可简化为用绝对值形式表示，以使摄影者的计算较为简便。

牛顿公式

$$x\,x' = f^{2} \tag{2—1c}$$

高斯公式

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \tag{2—2c}$$

放大率公式①

$$\begin{aligned} m &= \frac{h'}{h} \\ &= \frac{l'}{l} \\ &= \frac{f}{x} = \frac{f}{l - f} \\ &= \frac{x'}{f} = \frac{l' - f}{f} \\ &= \frac{1}{l_f - 1} = \frac{1}{x_f} \\ &= l_f' - 1 = x_f' \end{aligned} \tag{2—3c}$$

式中 l_f 为物距系数，指物距 l 用摄影镜头焦距 f 的倍数表示时的倍率值，即

$$l_f = l/f$$

l_f' 为像距系数，指像距 l' 用摄影镜头焦距 f 的倍数表示时的倍率值，即

$$l_f' = l'/f'$$

x_f 为焦物距系数，指焦物距 x 用摄影镜头焦距 f 的倍数表示时的倍率值，即

$$x_f = x/f$$

x_f' 为焦像距系数，指焦像距 x' 用摄影镜头焦距 f 的倍数表

① 摄影界在谈及影像放大率时，一般指用绝对值表示的影像垂轴放大率。

示时的倍率值，即

$$x_f' = x'/f$$

物距公式

$$\begin{aligned} l &= \frac{l'}{m} \\ &= f\ (1 + 1/m) \\ &= f + \frac{hf}{h'} \\ &= \frac{l'f}{l' - f} \\ &= l_f \times f \end{aligned} \qquad (2—4c)$$

像距公式

$$\begin{aligned} l' &= m\,l \\ &= f\ (1 + m) \\ &= f + \frac{h'f}{h} \\ &= \frac{lf}{l - f} \\ &= l_f' \times f \end{aligned} \qquad (2—5c)$$

物高公式

$$\begin{aligned} h &= \frac{h'}{m} \\ &= \frac{h'\ (l - f)}{f} \\ &= \frac{h'f}{l' - f} \end{aligned} \qquad (2—6b)$$

像高公式

$$\begin{aligned} h' &= mh \\ &= \frac{h\ (l' - f)}{f} \end{aligned}$$

$$= \frac{hf}{l-f} \qquad (2—7b)$$

焦像距公式

$$x' = f\,m \qquad (2—8b)$$

当摄影镜头的焦距不变时，将一系列物距 l 值代入公式（2—5c）和（2—3c）中，可求出一系列像距 l' 值和垂轴放大率 m 值。为便于比较和总结出规律，我们将 l、l'、x、x' 值均用焦距 f 的倍数表示，即分别用 l_f、l_f'、x_f、x_f' 表示。参见表 2—1 中所示。

表 2—1 物距系数与像距系数、焦物距系数、焦像距系数及影像放大率的对应关系（均为绝对值）

l_f	l_f'	x_f	x_f'	m
1	∞	0	∞	∞
1.001	1001	0.001	1000	1000
1.01	101	0.01	100	100
1.1	11	0.1	10	10
1.2	6	0.2	5	5
1.5	3	0.5	2	2
2	2	1	1	1
3	1.5	2	0.5	0.5
6	1.2	5	0.2	0.2
11	1.1	10	0.1	0.1
101	1.01	100	0.01	0.01
1001	1.001	1000	0.001	0.001
∞	1	∞	0	0

对表 2—1 数据进行分析和研究后，可以总结出摄影镜头成像时，物距 l 与像距 l' 及影像性质之间的对应规律，参见表 2—2 所示。

由表 2—1 和表 2—2 可以获知，摄影时，物距与像距及影像

放大率均成反比关系，即物距愈小，则像距和影像放大率均愈大；在拍摄近距离处的景物时，物距的较小范围变化，将使像距产生较大的变化；而在拍摄远距离处的景物时，尽管物距已变化了数米长度，可像距的变化却很微小。因此，摄影镜头调焦环上的调焦距离标尺刻线，不是按距离等分的。

表 2—2　物距与像距及影像性质的对应关系（均为绝对值）

物距 l	像距 l'	影像性质
$l=\infty$	$l'=f$	缩小的倒立实像，物与像分别位于镜头前后两侧
l 由 ∞ 向 $2f$ 值缩短	l' 由 f 值向 $2f$ 值延长	同　　上
$l=2f$	$l'=2f$	1:1 的倒立实像，物与像分别位于镜头前后两侧
l 由 $2f$ 值向 f 值缩短	l' 由 $2f$ 值向 ∞ 延长	放大的倒立实像，物与像分别位于镜头前后两侧
$l=f$	$l'=\infty$	同　　上
$l<f$	$l'>l$	放大的正立虚像，物与像位于镜头同侧

利用公式（2—1c）或（2—2c），可在物距 l 和像距 l' 已知的情况下，确定应选择多大焦距的摄影镜头。

利用公式（2—3c），可在物距 l 与像距 l'（或物高 h 与像高 h'、物距 l 与焦距 f、像距 l' 与焦距 f，焦物距 l_f）已知的情况下求影像放大率。

利用公式（2—4c），可在焦距 f 与影像放大率 m（或与像距 l'）已知的情况下，确定物距。

利用公式（2—5c），可在焦距 f 与影像放大率 m（或与物距 l）已知的情况下，确定像距。

利用公式（2—6b），可在像高 h' 与影像放大率 m（或与焦距 f 及物距 l、与焦距及像距 l'）已知的情况下，确定物高。

利用公式（2—7b），可在物高 h 与影像放大率 m（或与焦距 f 及物距 l、与焦距 f 及像距 l'）已知的情况下，确定像高。

利用公式（2—8b），可在摄影者使用近摄接圈或近摄皮腔进行近摄时，迅速确定出为获得预期的影像放大率，应选哪一长度的近摄接圈，或应将近摄皮腔调节至多长后拍摄。即所选近摄接圈或近摄皮腔的长度应等于所用摄影镜头焦距与欲获得之影像放大率的乘积。

例一、已知物距 $l = 5$ 米，摄影镜头焦距 $f = 50$ 毫米，被摄物体高度 $h = 1$ 米，求像高 h' 和影像放大率 m。

解：由公式（2—7b）可知

$$h' = \frac{hf}{l - f}$$

$$\therefore \quad h' = \frac{1000 \times 50}{5000 - 50} = 10.1 \text{ 毫米}$$

由公式（2—3c）可知

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{10.1}{1000} = 0.0101$$

例二、已知摄影镜头的焦距 $f = 50$ 毫米，物距 $l = 0.2$ 米，求像距 l'？

解：由公式（2—5c）可知

$$l' = \frac{lf}{l - f}$$

$$\therefore \quad l' = \frac{200 \times 50}{200 - 50} = 66.67 \text{ 毫米}$$

例三、已知男演员身高 1.8 米，若用焦距为 $f = 50$ 毫米的摄影镜头拍摄 35 毫米、1:1.66 遮幅宽银幕电影（曝光窗高为 $h' = 13.28$ 毫米），求为使曝光窗刚好摄下该演员身高时的物距 l？

解：由公式（2—4c）可知

$$l = f + \frac{hf}{h'}$$

$$\therefore \qquad l = 50 + \frac{1800 \times 50}{13.28} = 6.83 \text{ 米}$$

例四、已知某物体的物距为 $l = 2$ 米，求用焦距为 $f = 50$ 毫米的摄影镜头拍摄该物体的 35 毫米普通电影（曝光窗高为 $h' = 16$ 毫米）时，可拍摄下的物体最大高度 h？

解：由公式（2—6d）知

$$h = \frac{h'\ (l - f)}{f}$$

$$h = \frac{16 \times\ (2000 - 50)}{50} = 0.624 \text{ 米}$$

放大镜或目镜的视放大率 M，一般指当被观察物体（设高度为 h）位于该放大镜或目镜物方焦平面处时的视角正切（$\text{tg}\theta_{\text{目镜}} = h/f'$），与人眼在明视距离处直接观看该物体时的视角正切（$\text{tg}\theta_{\text{眼}} = h/250$）之比。

$$\therefore \qquad M = \frac{250}{f'} \qquad (2—8)$$

例：已知目镜焦距为 50 毫米，求该目镜的视放大率 M？

解：由公式（2—8）知

$$M = \frac{250}{f'}$$

代入

$$M = \frac{250}{50}$$

$$= 5 \times$$

四、光学系统的组合

在工作中经常需要将几个独立光学系统或几个光组组合在一起，并求其组合后之等效光学系统的焦距值和各基准点的位置。

例如，摄影中经常需在摄影镜头前方加近摄镜进行近摄，或

在摄影镜头后方加倍率镜以获得较大的影像。而摄影镜头本身一般也是由若干个光组组合而成的，各光组可能是单片透镜、也可能是已组合在一起的复杂透镜组。

总之，当两个独立的共轴球面光学系统或两个光组前后叠加且光轴重合时，将组合成一新的共轴球面光学系统。该组合后之新光学系统的焦距 f' 和 f 的计算公式如下

$$f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta}$$

$$= \frac{f_1' f_2'}{f_1' - f_2 - d} \qquad (2\text{—}9a)$$

$$f = \frac{f_1' f_2'}{\Delta}$$

$$= -\frac{f_1 f_2}{f_1' - f_2 - d} \qquad (2\text{—}9b)$$

若光学系统位于空气介质中时，

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - d} = -f \qquad (2\text{—}9c)$$

式中 f_1、f_1' 为第一光学系统的物方和像方焦距

f_2、f_2' 为第二光学系统的物方和像方焦距

Δ 为第一光学系统像方焦点 F_1' 至第二光学系统物方焦点 F_2 之间的距离

d 为第一光学系统像方主点 H_1' 至第二光学系统物方主点 H_2 之间的距离。参见图 2—6 中所示。

若两独立光学系统彼此间的距离非常近，以至 d 远小于 f_1' 与 f_2' 之和时，公式（2—9c）可简化为

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2'} = -f \qquad (2\text{—}9d)$$

组合之后新光学系统的光焦度 φ 的计算公式如下：

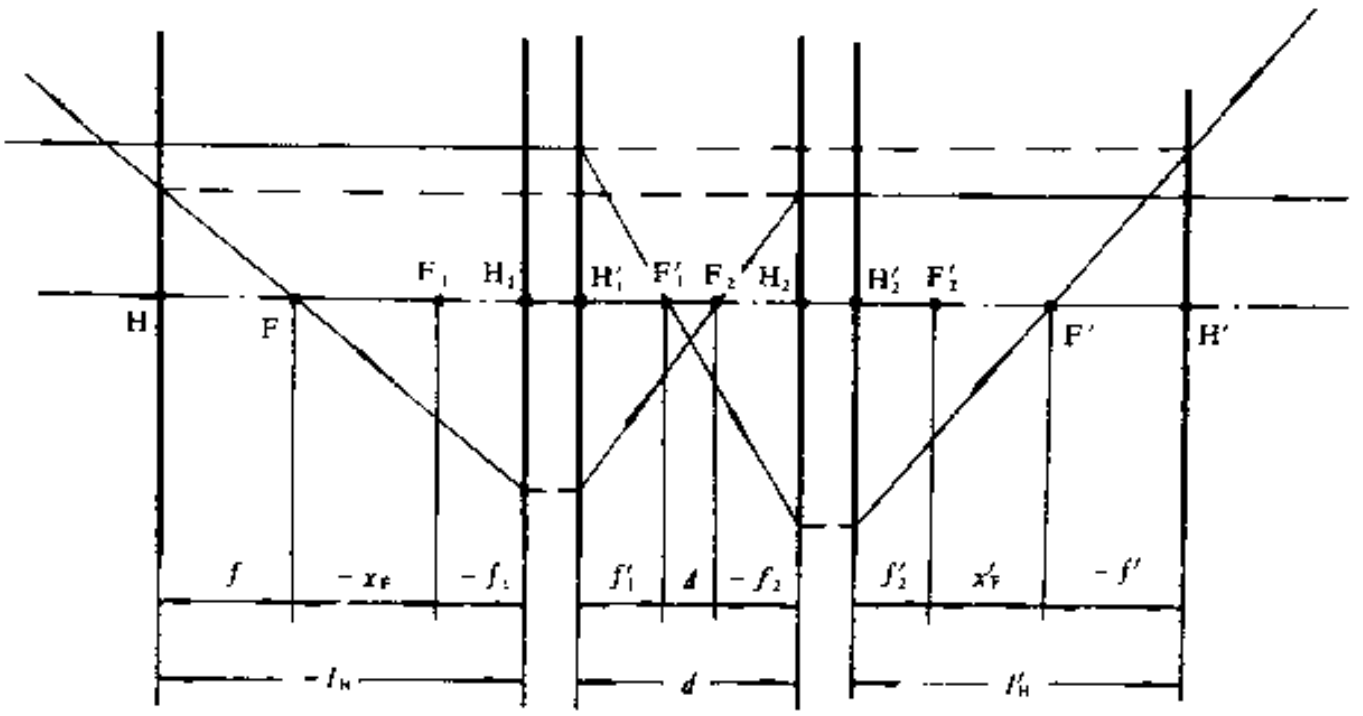


图 2—6　光学系统的组合

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 \qquad (2—10)$$

式中 φ_1 为第一光学系统的光焦度值

φ_2 为第二光学系统的光焦度值。

组合后之新光学系统的物方焦点 F 和像方焦点 F′的位置，可由下述公式计算出：

$$x_F' = -\frac{f_2 f_2'}{\Delta} = \frac{f_2 f_2'}{f_1' - f_2 - d} \qquad (2—11)$$

$$x_F = \frac{f_1 f_1'}{\Delta} = -\frac{f_1 f_1'}{f_1' - f_2 - d} \qquad (2—12)$$

式中 x_F'为第二光学系统像方焦点 F'_2 至新光学系统像方焦点 F′之间的距离

x_F 为第一光学系统物方焦点 F_1 至新光学系统物方焦点 F

之间的距离

组合后之新光学系统的物方主点 H 和像方主点 H′的位置，可由下述公式计算出：

$$l_H' = -f' \cdot \frac{d}{f_1'} = -\frac{f_2' d}{f_1' - f_2 - d} = \frac{f_2' \ (f_1' - f_2 + \Delta)}{\Delta} \qquad (2—13)$$

$$l_H = f \cdot \frac{d}{f_2} = -\frac{f_1' d}{f_1' - f_2 - d} = \frac{f_1 \ (f_1' - f_2 + \Delta)}{\Delta} \qquad (2—14)$$

式中 l_H'为第二光学系统像方主点 H_2'至新光学系统像方主点 H′之间的距离

l_H 为第一光学系统物方主点 H_1 至新光学系统物方主点 H 之间的距离。

如果欲由若干个独立光学系统组合成一新的光学系统（如由若干片透镜组合成一摄影镜头），则该新光学系统的总焦距值 f 的计算方法如下：先用公式（2—9）至（2—14）求出二个独立光学系统的组合焦距值，及各基准点（F、F′、H、H′）的位置，然后将该二独立光学系统视为一个独立的整体，求其与第三个独立光学系统的组合焦距值，及各基准点的位置，余类推。直至求出全部光学系统的总组合焦距值，及总组合系统的焦点和主点位置。

例 1、在焦距为 $f' = 50$ 毫米的标准摄影镜头前加焦距为 $f' = 100$ 毫米的近摄镜，求当 d 值依次为 20 毫米、40 毫米时，组

合光学系统的焦距 f 及 l_H'、l_H 值?

解：1.　$d = 20$ 毫米

由公式（2—9c）知

$$f' = \frac{f_1' \cdot f_2'}{f_1' + f_2' - d}$$

$$= \frac{100 \times 50}{100 + 50 - 20}$$

$$= 38.46 \text{ 毫米}$$

由公式（2—13）和（2—14）知

$$l_H' = -\frac{f_2' d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{50 \times 20}{100 - (-50) - 20}$$

$$= -7.69 \text{ 毫米}$$

$$l_H = -\frac{f_1 d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{-100 \times 20}{100 - (-50) - 20}$$

$$= 15.38 \text{ 毫米}$$

2. $d = 40$ 毫米

由公式（2—9c）知

$$f' = \frac{f_1' \cdot f_2'}{f_1' + f_2' - d}$$

$$= \frac{100 \times 50}{100 + 50 - 40}$$

$$= 45.45 \text{ 毫米}$$

由公式（2—13）和（2—14）知

$$l_H' = -\frac{f_2' d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{50 \times 40}{100 - (-50) - 40}$$

$$= -18.18 \text{ 毫米}$$

$$l_H = -\frac{f_1 d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{-100 \times 40}{100 - (-50) - 40}$$

$$= 36.36 \text{ 毫米}$$

比较上述计算结果可知：当二光学系统前后叠加时，虽然二者各自的焦距值均固定不变，但改变二者之间的距离 d，可使组合焦距值改变，此即变焦距摄影镜头之能够改变焦距的原理；在摄影镜头前加近摄镜后，可使组合光学系统的组合焦距值比原摄影镜头的焦距值明显缩短，使组合光学系统的像方主点比原摄影镜头的像方主点明显前移，以至使像距显著增大，从而可拍摄下更近的物体，并获得垂轴放大率较大的影像；加近摄镜时，随着近摄镜与摄影镜头之间距离 d 的缩短，组合焦距值将明显缩小。

例 2、在焦距为 50 毫米的光学系统前方或后方加焦距为 100 毫米的负透镜，间距 d 为 40 毫米，求组合光学系统的焦距 f' 及 l_H'、l_H 值?

解：1. $f_1' = -100$ 毫米、$f_2' = 50$ 毫米

由公式（2—9c）知

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - d}$$

$$= \frac{-100 \times 50}{-100 + 50 - 40}$$

$$= 55.56 \text{ 毫米}$$

由公式（2—13）和公式（2—14）可知

$$l_H' = -\frac{f_2' d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{50\times 40}{-100-(-50)-40}$$

$$= 22.22 \text{ 毫米}$$

$$l_H = -\frac{f_1 d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{100\times 40}{-100-(-50)-40}$$

$$= 44.44 \text{ 毫米}$$

2. $f_1' = 50$ 毫米、$f_2' = -100$ 毫米

由公式（2—9c）可知

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - d}$$

$$= \frac{50\times(-100)}{50+(-100)-40}$$

$$= 55.56 \text{ 毫米}$$

由公式（2—13）和（2—14）可知

$$l_H' = -\frac{f_2' d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{(-100)\times 40}{50-(+100)-40}$$

$$= -44.44 \text{ 毫米}$$

$$l_H = -\frac{f_1 d}{f_1' - f_2 - d}$$

$$= -\frac{-50\times 40}{50-100-40}$$

$$= -22.22 \text{ 毫米}$$

比较上述计算结果可知，当一正、一负两光学系统前后叠加时，若二者各自的焦距值及间距 d 均保持不变，则该组合光学系统物方主点 H 的具体位置，将视负组光学系统在前方或后方，而产生截然相反的变化：负组光学系统在前方时，组合光学系统

主点 H、H′显著后移，这是反摄远型短焦距摄影镜头能够安装在单镜头反光照相机上，进行正常取景和拍摄的根本原因；负组光学系统在后方时，组合光学系统主点 H、H′显著前移，这是摄远型长焦距摄影镜头长度明显缩短（甚至比镜头焦距还短）的根本原因。

五、玻璃滤光镜与分光棱镜对摄影镜头成像的影响

当倾斜光线通过两表面彼此平行的平板玻璃（如玻璃滤光镜、分光棱镜）时，平板玻璃的折射作用将使出射光线相对入射光线，产生轴向偏移（该偏移量将随光线的倾斜角度不同而变化），且出射光线与入射光线平行。如图 2—7 所示。显然，有限远物点发出的光线通过上述平板玻璃时，同心光束将变为非同心光束。

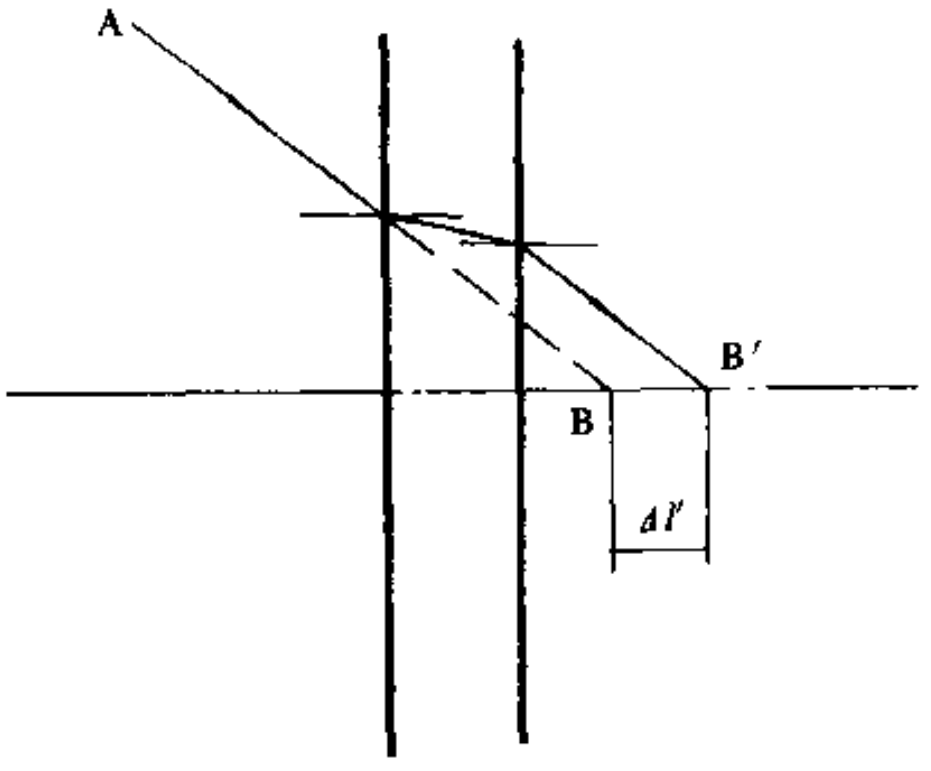


图 2—7 平板玻璃对成像的影响

对于近轴光束而言，其轴向偏移量 $\Delta l'$ 为：

$$\Delta l' = b\ (1 - \frac{1}{n}) \qquad (2—15)$$

式中 b 为平板玻璃的厚度

n 为平板玻璃的折射率

正由于光线通过平板玻璃时将产生轴向偏移，因而将使摄影时的实际物距或像距产生变化。摄影者应密切注意这一变化将对摄影带来的影响。此外，滤光镜和分光棱镜本身的质量（如不平度、气泡等）也影响成像质量。

例 1、在微距摄影中，欲在摄影镜头前端加用玻璃滤光镜拍摄时，由于物距很小，故应在安装上玻璃滤光镜后再调焦。反之，若在调好焦后再加玻璃滤光镜并拍摄，则玻璃滤光镜所引起的光线轴向偏移，将使所摄影像清晰度降低。

例 2、使用普通摄影镜头拍摄时，一般不宜将玻璃滤光镜安置在摄影镜头后端拍摄，以免该镜片引起的轴向偏移使像距明显增大，而影响所摄画面的清晰度。

例 3、某些长焦距摄影镜头备有后置玻璃滤光镜，由于在设计时已对玻璃滤光镜所引起之光线轴向偏移作了补偿，故摄影时既不允许一片滤光镜不加（起码应加 UV 镜），也不允许同时连加几片，并且不宜随意用其它滤光镜代用，以免影响所摄影像清晰度。

例 4、海鸥 S-16B 型 16 毫米电影摄影机，其配套之摄影镜头的像面定位距为 17.526 毫米。由于机身上摄影光路中安装有供取景用的分光棱镜，而该分光棱镜的厚度 $b = 8$ 毫米，材料为 BaK_9（折射率 $n = 1.5743$），故由公式（2—15）可知，该分光棱镜将使像距延长 $\Delta l' = 2.918$ 毫米。因此，该摄影机机身的像面定位距值应为 20.44 毫米。

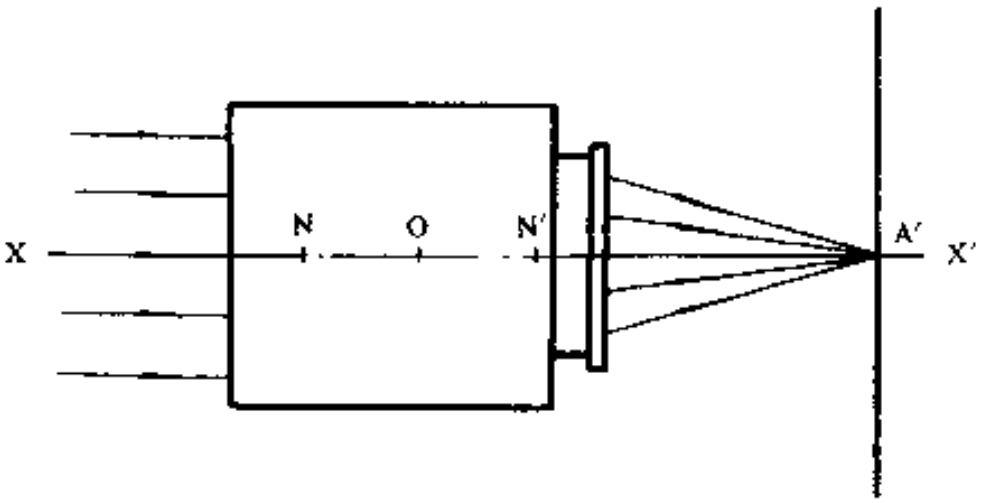
第二节 节点、主点在摄影实践中的意义

由于节点是角放大率为正1的一对共轭点，所以当使像平面保持不动，而单独令水平放置的摄影镜头绕与光轴垂直相交的铅垂轴，做有限角度的左右摇摆时，可以发现下述规律：若摇摆轴刚好通过该摄影镜头的像方节点N′，则平行光束在像平面上所结成的影像，在镜头摇摆时将始终保持不动；反之，若摇摆轴未通过像方节点N′，则该平行光束在像平面上的影像，必将随着镜头的摇摆而发生位移。如图2—8所示，未摇摆前平行光束的清晰影像原本在A′点（见*a*图）；在绕像方节点N′摇摆后，该平行光束的清晰影像仍结在A′点（见图*b*）；若摇摆轴0未过N′，则摇摆后该平行光束的清晰影像却结在B′点处了（见*c*图）。

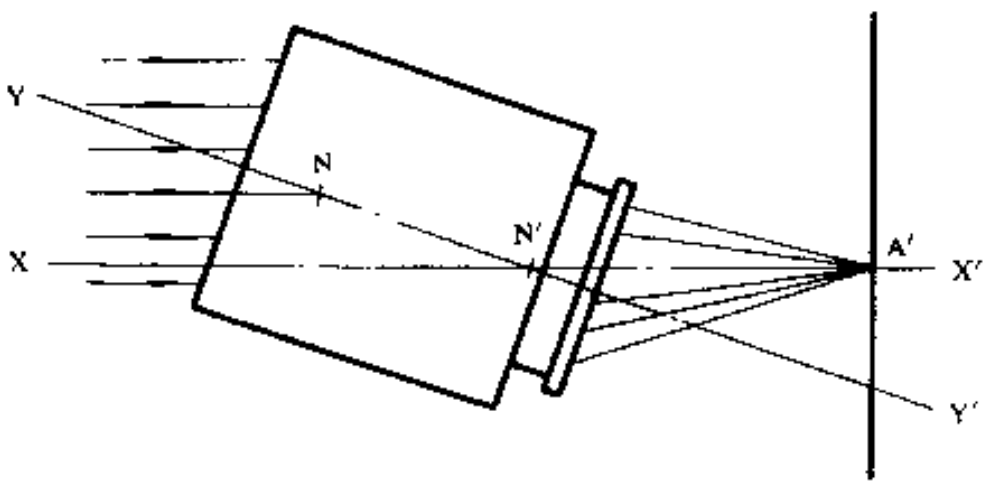
虽然平时看不见摄影镜头的节点，但依据上述规律做一简易工具，边左右摇摆摄影镜头边使镜头前后移动，直至平行光束或无限远景物所成影像在摇摆时不发生移位为止。根据此时摇摆轴线与光轴相交的位置，就可准确测量出该摄影镜头像方节点N′的位置。使镜头前后颠倒后重复上述实验，还可测量出物方节点N的准确位置。

由于普通摄影时，物空间与像空间的介质均为空气，摄影镜头的物方主点和像方主点分别与其物方节点和像方节点重合，因而该镜头的主点位置也就同时获知了。此外，还可根据主点和焦点的位置，确定出任意复杂光学系统的焦距值。

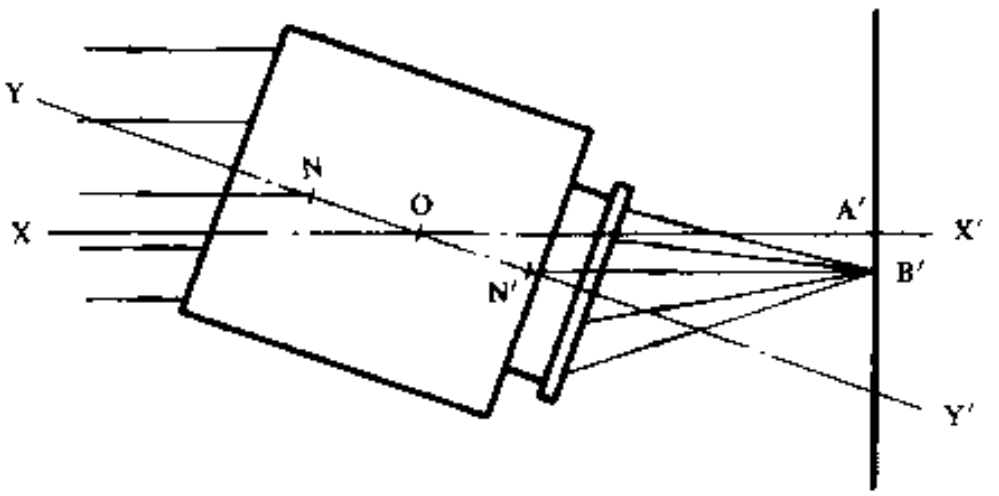
节点和主点及其在摄影镜头上的具体方位，对摄影实践具有很大的意义。



a.



b.



c.

图 2—8　节点特点

一、主点在摄影镜头设计与选购中的意义

在摄影镜头设计中，一般有意将长焦距摄影镜头的像方主点H′，设计在整个摄影镜头的前方（参见图2—2a所示），亦即使该长焦距摄影镜头的总长度比其焦距值还短。为此，常采用后组为负组透镜的光学结构（参见第二章第一节四中例2的计算分析），俗称摄远型摄影镜头。

长焦距摄影镜头主点前移的设计，使得该镜头的长度、体积和重量均显著缩小，从而既便于携带，又方便了操作。

在设计单镜头反光取景式照相机、或同轴反光取景式电影摄影机使用的短焦距摄影镜头时，一般又有意将短焦距镜头的像方主点H′，设计在整个摄影镜头的后方（参见图2—2b所示），此时，该镜头的总长度比标准摄影镜头还长。为此，常采用前组为负组透镜的光学结构（参见第二章第一节四中例2的计算分析），俗称反摄远型摄影镜头。

短焦距摄影镜头主点后移的设计，使得该镜头后方的空间明显增大，以便使其后方能留有安装取景反光镜、快门、遮光器、曝光窗等装置的充裕空间（否则，无法实现短焦距摄影镜头的单镜头反光取景）。

此外，摄影镜头主点前移的设计，还可为近摄时的布光留有更充分的选择余地，从而方便布光。例如，尼柯自动200毫米、1:5.6的医用摄影镜头，该镜头全长仅173毫米（比焦距值短27毫米），其像方主点H′位于镜头第一片透镜前顶点的前方3毫米，而物方主点H又在H′前方143.2毫米处。显然，近摄时的布光照明空间很大：当调焦距离为3.4米时，仍可获得高达1:15的影像放大率；若加配套之近摄镜后，其影像放大率可达1:8～3:1。该镜头还备有环状无影X闪光灯，当调好胶片的ISO值和

影像放大率后，前后移动照相机至被摄主体影像清晰时即可按快门拍摄，镜头内的自动补偿机构可自动选择光圈的大小，并可在底片右下角处印上摄影时的具体影像放大率值。

二、摄影镜头的倒装近摄

由于反摄远型摄影镜头的主点均偏后，甚至位于摄影镜头的后方，放将这类镜头卸下，倒装在单反照相机或反光取景式电影摄影机上时，主点位置也随镜头的颠倒而偏前了，于是像距显著增大，从而使该摄影镜头可拍摄更近物距下的景物，并获得更大的影像放大率。

单镜头反光照相机和反光遮光器取景式电影摄影机的短焦距镜头，一般是反摄远型摄影镜头，故可倒装近摄。甚至这类照相机、电影摄影机的某些标准镜头因主点稍偏后，所以也可倒装后进行近摄。图 2—9a 所示为用 135 单镜头反光照相机 50 毫米标准焦距镜头，在最近距离处所拍摄的全画幅影像；图 2—9b 所示为将该镜头卸下后倒装在同一照相机镜头座上近摄时所拍摄之同一物体的全画幅影像，显然后者影像放大率增加很大。

利用反摄远型镜头和单反照相机某些标准镜头倒装后近摄的性能，可为没有微距摄影镜头和近摄器材的业余摄影爱好者，提供一个拍摄微小物体的简捷方法。为在倒装近摄时，改善成像质量，建议用较小光圈拍摄，并注意在必要时用手将镜头后端的自缩光圈杆拨至光圈最小处（例如，奥林巴斯 OM20 型 135 照相机的镜头自机身上卸下后，光圈即处在最大状态，只有用手拨动自缩光圈杆，才可使其收至所调节的小光圈状态）。此外，若摄影者不具有倒装镜头的接环时，也可用手拿着镜头浮摆在镜头座前拍摄。只是应注意镜头前端要与镜头座贴紧以防漏光，且镜头轴线刚好与镜头座中心线对正。罗莱弗莱克斯 SL-66 型照相机的镜

头均有倒装卡口。

a.

b.

图 2—9 倒装近摄

判断摄影镜头是否是反摄远型的方法很简单：分别从摄影镜头前后两端观看其内部的光圈大小，若自前、后方看到的光孔直径近似相等，则为普通摄影镜头；若从前方看到的光圈直径远小

于（大于）自后方看到的尺寸，则为反摄远型镜头（摄远型镜头）。

有些变焦距摄影镜头也具有倒装近摄性能。例如，尼柯 43～86 毫米、1:3.5 变焦距摄影镜头，通过 BR-2 型倒装近摄接环倒装在机身上后，影像放大率可自 1:6 至 1:1 自由调节。若再于镜头后端（已位于朝向景物一方）安装上 BR4 型接环和双头快门线，则还可在倒装近摄时，自动控制光圈的收缩。

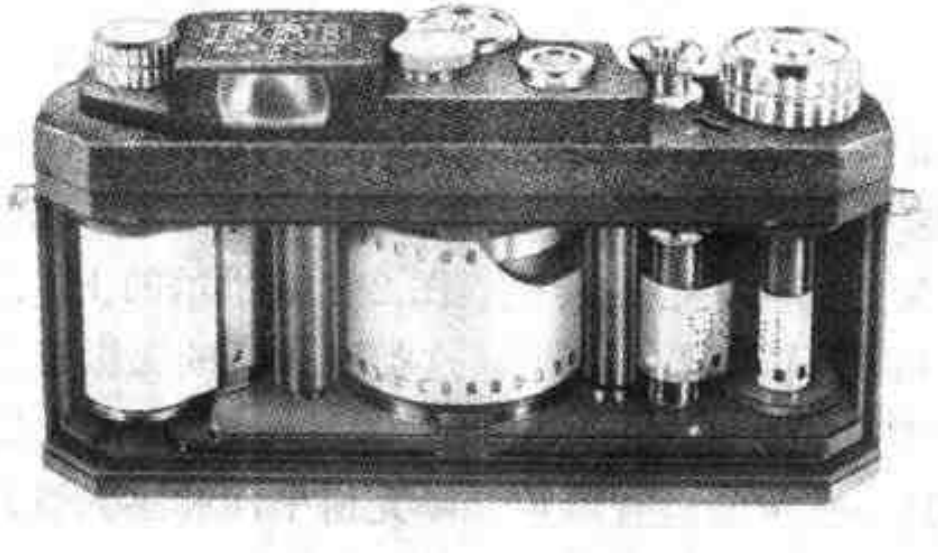
三、转机的拍摄原理

在拍摄人数众多的大型团体照时，由于场面庞大，故用普通照相机较难摄下每个人均相当清晰而又不变形的画面。

由于摄影镜头绕像方节点 N′作有限角度的左右摇摆时，被摄景物在像平面上所成影像可以保持相对静止，因此，诞生了以像方节点 N′为回转中心的转机。图 2—10 所示的 135 照相机就是一种可做 140°回转摄影的转机。这类照相机的摄影镜头前有一可通光的狭窄竖直缝隙（起遮挡杂光作用），摄影镜头后方的曝光窗形状也是一狭窄的竖直缝隙，曝光窗平面和感光胶片平面均呈圆柱面，该圆柱面的轴线就是过摄影镜头像方节点 N′的摇摆轴线。摄影时先把照相机固定在三脚架上，被摄人群坐或站在以像方节点 N′为圆心的圆弧线上，对被摄者准确调焦，并调节好快门时间（一般是依靠改变摄影镜头的回转角速度或曝光窗上竖直狭窄缝隙的宽度来获得不同的快门时间的），按下快门钮后，照相机机身和感光胶片仍保持静止不动，而由摄影镜头及其前后两方的狭窄竖直缝隙，作绕 N′点的同步匀速回转运动，从面完成全部曝光工作。

转机的工作原理如图 2—11 所示。当曝光窗缝隙位于 b_1 时，自左前方被摄景物来的光线，可通过摄影镜头后方的缝隙投射到

a.



b.

图 2—10 转机

感光胶片上，并结成清晰影像；当摄影镜头连同曝光窗缝隙绕 N′点沿顺时针方向转至相机正前方时，自正前方被摄景物来的光线，可通过摄影镜头在感光胶片的 b_2 处结成清晰影像（此时 b_1 处早已终止曝光），随着摄影镜头的回转，曝光窗缝隙将依次扫过整个感光胶片，摄下宽阔的大型团体人像。正由于拍摄时摄影镜头是绕像方节点 N′回转的，故静止人物在胶片上所结成的影像也呈静止状态，从而可摄下清晰的人像。

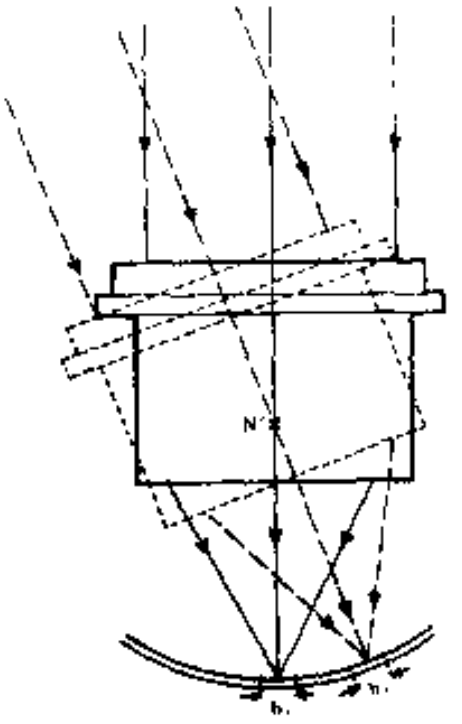


图 2—11　转机工作原理

有些转机为能摄下周围 360°空间的影像，采取了另外一种回转结构：照相机机身和摄影镜头均安装在一圆形轨道上，该圆形轨道的中心刚好通过摄影镜头的像方节点 N′，曝光窗仍是一可调宽狭的缝隙，摄影时机身随同摄影镜头一同在圆形轨道上绕 N′点回转，而机身内的感光胶片做反方向的匀速运动。使用这类转机拍摄前，应根据所用镜头焦距的长短及调焦距离的远近，匹配好带动照相机回转及胶片移动的各传动齿轮的齿数（一般焦距短、调焦距离远时，所用齿轮齿数较大，故胶片移动速度将较慢；而焦距长、调焦距离近时则反之）。一旦匹配好传动速比后，就可在照相机和摄影镜头匀速同步回转时，使景物各部位的像点相对胶片保持稳定不变，从而保证获得清晰的影像。

拍摄大型团体照片时摄影者应注意以下问题：

若使用转机拍摄团体照，由于转机的曝光窗为一狭窄的竖直隙缝，摄影时转机以过像方节点的铅垂轴为回转轴，在水平面上旋转着拍摄的，因而拍摄时该曝光窗的位置也随同摄影镜头在不

停地绕像方节点旋转着。亦即整个回转拍摄过程中，摄影镜头的成像面为一圆柱形表面，参见图 2—10b 中所示（图中装片时感光胶片的曝光部位呈圆弧形）。正由于拍摄时，摄影镜头的光轴沿水平面不停地旋转着，因而一排被摄者系自左至右地依次被正对着的摄影镜头先后曝光的。也正因为像平面为一圆柱形表面，故此就要求所有被摄者必须在以照相机为圆心的一个圆弧线上站成一排，即同一排上的所有被摄者必须在面对摄影镜头光轴时具有相同的物距，以确保使一排被摄者均能获得最清晰的影像，并获得相同的影像放大率。

若使用普通照相机拍摄团体照，则照相机摄影镜头的光轴将恒朝向前方静止着拍摄。由于普通照相机的曝光窗呈平面形状，并与摄影镜头光轴垂直，在拍摄时该曝光窗的位置又恒保持不变，因而拍摄时的成像面为一平面。也正因为成像面为一平面，故此就要求所有被摄者必须在照相机正前方沿着垂直于摄影镜头光轴的平面上站成一排，即同一排上的所有被摄者在静止的摄影镜头前必须具有相同的物距，以确保使一排被摄者均能获得最清晰的影像，并获得相同的影像放大率。

有人用普通照相机在拍摄团体照时，模仿用转机拍摄时的方法，也让被摄者站在以照相机为圆心的圆弧线上进行拍摄。从上述可知，这种方法显然是不妥的，这不但难以保证画幅中央与画幅边缘的人像同时达到最清晰，而且还将使画幅边缘的人物的影像变得比画幅中央的人物为大。

四、电影特技的“摇摄”与节点云台

在电影摄影中，由于剧情的要求，常常需要拍摄一些特殊的景物（如不复存在的古代豪华建筑）、特殊的场面（如危险场面），而且既要求银幕效果真实，又没有充裕的经费。此时摄影

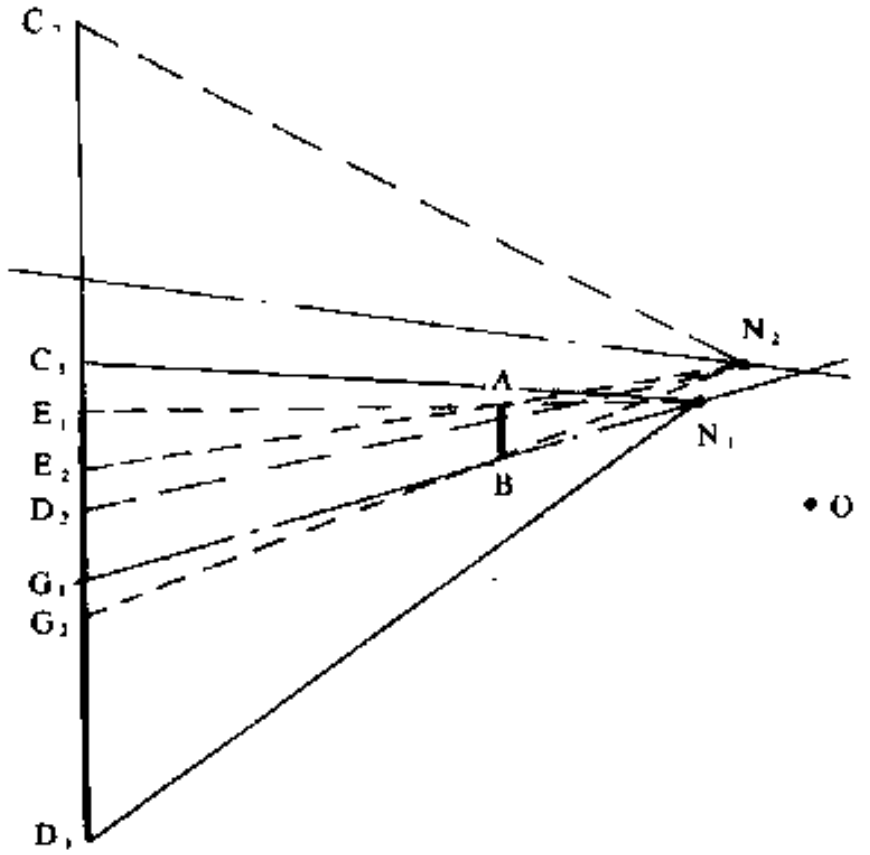
者常根据造型要求，将欲摄景物按缩小后的比例制成小模型、或绘画在玻璃上。在拍摄时将上述小模型或绘画直接放置在摄影镜头跟前，然后通过电影特技摄影的透视合成技法，将假模型或绘画与后方的真人、实景拍摄在同一画面中，从而达到既以假乱真、又节省费用的目的。

为了使所摄画面的银幕效果更真实、更生动、更自然，常常希望在透视合成时进行摇摄摄影①。

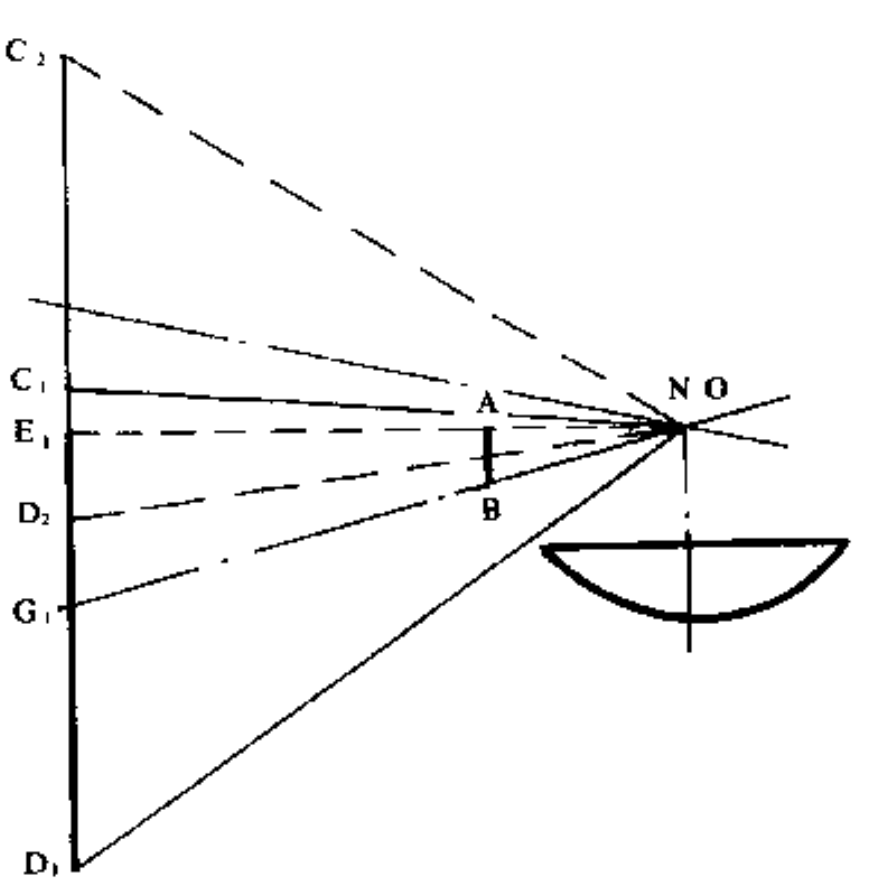
在电影透视合成摄影中进行摇摄，必须保证所摄画面不“穿帮”（指不能露出虚假和破绽）。为此，应将电影摄影机安装在专门的节点云台上，并使所用摄影镜头的物方节点 N 与该云台的回转轴相重合，然后才能进行正式摇摄。

例如，有一建筑 E_1D_1，其下部 G_1D_1 的形状符合剧情要求，面房顶造型不理想。为此专门在玻璃上绘制了一个房顶画面 AB，并放置在摄影镜头前方，用该画遮挡住建筑物的原房顶造型 E_1G_1。若摄影镜头物方节点 N 位于 N_1 处，则镜头所摄景物范围为 $\angle C_1N_1D_1$，且 N_1 与 A、E_1 点在同一直线上，由于俯仰轴线 O 与 N_1 不重合，故当摄影机绕“云台俯仰运动中心 O”向上摇一小角度后，物方节点将移至 N_2 点处，此时镜头所摄景物范围为 $\angle C_2N_2D_2$，而 N_2、A 与 E_2 点位于同一直线上。显然，当摄影镜头的物方主点自 N_1 摇至 N_2 位置后，实际景物中原本被绘画 AB 所遮挡的 E_1E_2 段将显露出来，从而使观众看到原被遮挡的部分屋顶，使画面露假、穿帮而失败。参见图 2—12a 中所示。但若将摄影机固定在专门的节点云台上（一般为船形云台），并使摄影镜头的物方主点 N 与节点云台的回转中心 O 相重合，则无论如何摇摄，物方节点 N 与

① 摇摄指在拍摄点位置不动的前提下，使摄影机做旋转运动，以便沿左右或上下方向逐一展示被摄景物的不同部位，获得巡视环境、烘托气氛等艺术效果。



a.



b.

图 2—12 透视合成

A、E_1 点始终在同一直线上，N 与 B、G_1 点也始终位于同一直线上，显然，就不会出现穿帮现象了。如图 2—12b 所示。

五、用变焦距摄影镜头模拟电影“推、拉镜头”效果

推、拉镜头[①] 拍摄技巧，可连续改变被摄景物的景别，使观众产生身临其境之感。变焦距摄影镜头可通过连续改变焦距的方法，在拍摄点不变的前提下，模拟上述推、拉镜头的画面效果（参见《摄影镜头的使用技巧》一书第五章第五节中有关内容）。

但在透视合成摄影时，若连续改变变焦距镜头的焦距值，则该镜头物方节点 N 的位置将随着焦距的改变而发生位移，从而易使透视合成画面穿帮。

为了利用变焦距镜头在透视合成中模拟出推、拉镜头的银幕效果，需制作专门的补偿装置，以便在变焦的同时，自动前后移动摄影机和镜头，使变焦距摄影镜头的物方节点 N 的位置，始终与被摄景物保持相对静止。

六、背景放映合成特技

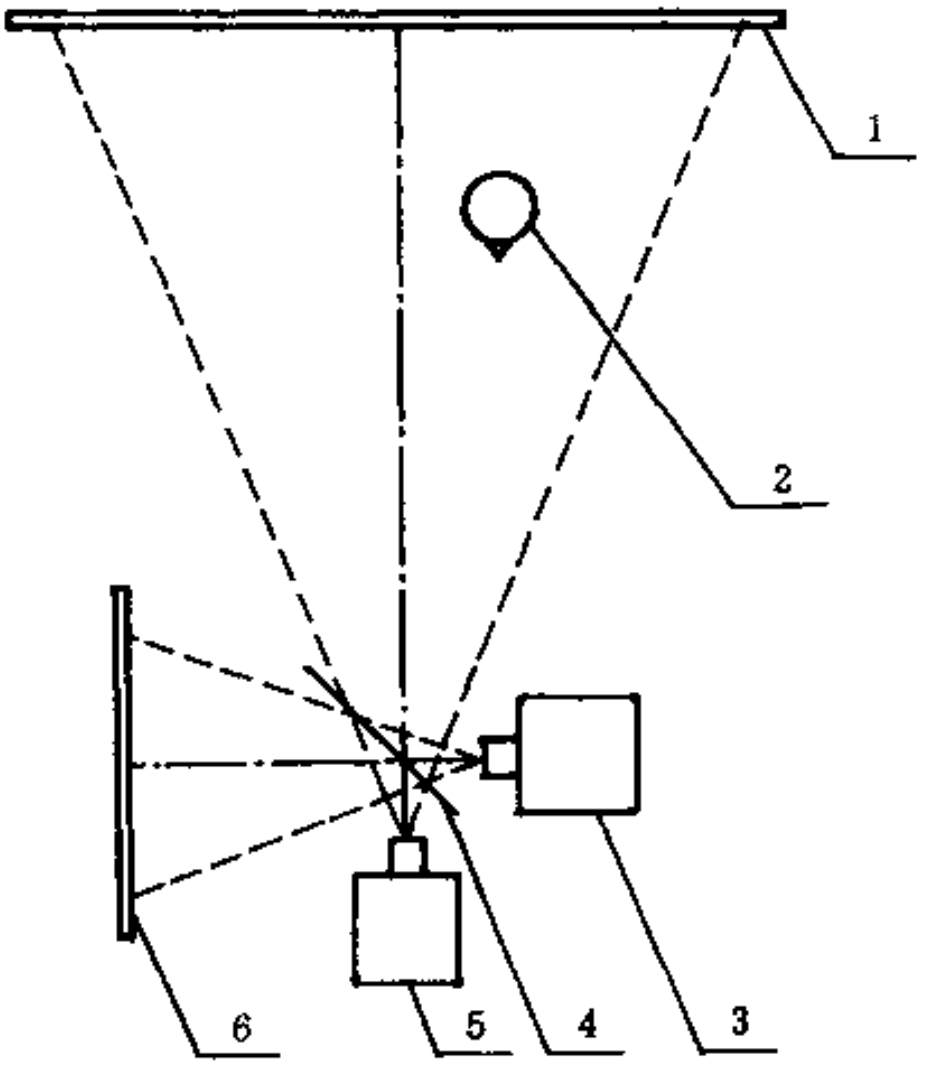
背景放映合成设备由一台放映机与一台摄影机（或幻灯机与照相机各一台），及一片半透射半反射镜与一个具有定向强反射功能的金属玻璃珠银幕共同组成。

背景放映合成特技指把已预先拍摄好的作为背景的电影（或幻灯）画面，通过上述放映机（或幻灯机）设备放映到特殊的金

---

① 被摄者位置不动，摄影机沿光轴方向向前或向后移动着拍摄，分别称为推镜头与拉镜头。在拍摄推镜头时，被摄者的影像放大率将跟着逐渐增大，使观众感到是由先看景物的全貌开始，然后慢慢走至近前，观看其局部细节；拉镜头则反之。

属玻璃珠银幕上，人物等被摄主体在该银幕前方进行表演，同时通过上述摄影机（或照相机）把前方人物与后方银幕上的影像同时拍摄到摄影机（或照相机）的感光胶片上，从而把预先已拍摄的作为背景的影像与现场表演的真实人物等，天衣无缝地人为合成在同一画面之上（参见图 2—13 中所示）。



1. 银幕　2. 被摄人物　3. 放映机（或幻灯机）
4. 半透射半反射镜　5. 摄影机（或照相机）
6. 黑色吸光屏

图 2—13　背景放映合成原理

运用背景放映合成特技摄影方法，可以把一系列平时无法拍摄下的场面拍摄下来。例如，先用摄影机拍摄一段蓝天白云的空镜头画面，尔后运用背景放映合成设备把该组画面放映到银幕

上，同时拍摄人物在上述银幕前的表演，即可拍摄出人物在天空上飞翔的逼真画面效果；又如，人并未出国，通过预先拍摄的幻灯片，却拍摄出了好似该人在埃及金字塔前、在巴黎艾菲尔铁塔前、在英国皇宫前、在美国国会大厦前等拍摄的纪念照，并足可以假乱真。若在放映画面中同时彼此反方向连续改变放映镜头与摄影镜头的焦距（如在使放映镜头向广角变焦的同时使摄影镜头向长焦变焦，或反之），则可模拟出被摄主体逐渐移近或远离的画面运动效果。在美国电影“超人”（1978 年摄制）中，即运用此一特技方法拍摄出了超人飞行的大量逼真画面。

背景放映合成特技拍摄成功的关键是，必须令放映机的放映镜头光轴与摄影机的摄影镜头光轴实现精确的光学重合的同时，令二镜头的物方节点也实现精确的光学重合。否则，一旦二物方节点彼此不重合，则所摄被摄主体的轮廓周围将会投射出黑色的轮廓线条，以至破坏了合成画面的真实感。而且该投影黑线的宽窄与被摄主体与背景银幕之间的距离成正比——二者距离愈远，则黑线愈明显（若所摄画面中没有其它前景，只有唯一的一个被摄主体，且该被摄主体刚好对称地位于摄影镜头的光轴上，如拍摄“特写”镜头，即实现景物的轮廓在画面上没有朝向光轴的内侧面，则另当别论）。

若使用柱面变形套镜拍摄变形宽银幕电影时，由于柱面变形套镜具有二个物方节点，故此为了有效地避免所摄画面上出现轮廓黑线，拍摄出逼真的画面效果，应使放映镜头二物方节点的中间位置处与摄影镜头二个物方节点的中间位置处精确重合，同时建议被摄主体的位置尽量靠近银幕进行拍摄（因为被摄主体愈靠近银幕拍摄，放映镜头与摄影镜头二者物方节点之重合误差所引起的轮廓黑线条，将愈不明显）。

思　考　题

1. 阐述下列定义：共轴球面光学系统、焦点、焦平面、主点、主平面、节点、焦距、物距、像距、焦物距、焦像距、影像放大率、物距系数？
2. 高斯公式、牛顿公式与影像放大率公式的计算？
3. 物距、像距与影像性质之间的关系？
4. 主点与节点的实用意义？那类镜头倒装可以近摄？为什么？

第三章　摄影镜头的技术性能及对摄影的影响

摄影者选择与评价摄影镜头，主要依据其下列技术性能指标的高低。

第一节　焦距与光学结构参数及视角

焦距、光学结构参数及视角是摄影镜头的重要技术性能指标。

一、设计焦距与标称焦距

设计焦距（Actual Focal Distance，Effective Focal Distance）指光学工作者在设计摄影镜头时，经过复杂的光学计算所获得的焦距数值，故又称实际焦距（该数值一般含有小数）。光学公司按设计数据制造一批摄影镜头时，因受加工误差影响而很难保证每一摄影镜头的具体实测焦距值，均与上述设计焦距值精确一致（一般允许二者间存在±1.5%的误差）。

因设计焦距值通常含有小数，不便称呼和标示，故生产厂家一般将其圆整为整数标示。此圆整后的焦距值，称为该摄影镜头的**标称焦距**[①]（Engraved Focal Distance，Nominal Focal Distance）或

① 本书下文所提焦距值，均指标称焦距。

名义焦距（设计焦距与标称焦距的误差应≤±5%）。单位一般为mm。

例如，图2—3b所示日本尼柯50毫米、1:1.2的摄影镜头，其标称焦距为50毫米，而实际焦距为51.6毫米。

摄影镜头的焦距用f表示（也有的不标注符号），其单位一般是毫米（老式摄影镜头也有用英寸或厘米作单位的）。在摄影镜头的前镜片压圈上或镜筒外圆周上，标示有该摄影镜头的标称焦距值。例如，当标示有“$f=50$”或“50mm”、“50”时，即表示该摄影镜头的标称焦距为50毫米。

照相机与电影摄影机使用的摄影镜头，其焦距的种类繁多——短至几毫米，长至上千毫米不等（航空摄影镜头的焦距长达3米，甚至3米以上）。并且不同国家、不同生产厂家往往有不同的系列标准。

我国国家标准GB9924-88中，对135照相机（又称35mm照相机）用定焦距摄影镜头与变焦距摄影镜头的焦距系列规定如下（单位为毫米）：

7.5、10、12、14、16、18、20、24、28、35、40、50、58、85、105、135、200、300、400、500、600、800、1000、1200、1500、2000、2500；20~35、28~55、28~70、28~85、28~135、35~70、35~105、35~135、35~210、50~135、50~300、70~210、80~200、85~300、100~200、100~300、200~400、150~600、360~1200。

国标GB9924-88中，对120（仅指6×6cm）照相机用定焦距摄影镜头的焦距系列规定如下（单位为毫米）：

24、30、40、50、60、75、80、90、105、120、150、200、250、350、500、600、800、1000。

瑞典哈苏公司（Hasselblad），对120照相机用定焦距摄影镜头的焦距系列，规定如下（单位为毫米）：

30、40、50、60、80、100、105、110、120、135、150、180、250、350、500。

日本尼康（Nikon）公司，对135照相机用普通手控定焦距摄影镜头的焦距系列，规定如下（单位为毫米）：

13、15、18、20、24、28、35、50、80、85、105、135、180、200、300、400、500、600、800、1000、1200、2000（此外尼康还有6、8、16毫米的鱼眼镜头，28、35毫米的透视调整镜头，55、105、200毫米的微距摄影镜头，105毫米的紫外线摄影镜头等特殊摄影镜头）。

日本尼康公司，对135照相机用普通手控变焦距摄影镜头的焦距系列，规定如下：

25～50、28～85、35～70、35～135、35～200、50～135、50～300、70～210、80～200、180～600、200～400、360～1200、1200～1700毫米（此外还有36～72、75～150、70～210毫米等特殊变焦距摄影镜头）。

尼康公司对135照相机用自动调焦的变焦距摄影镜头的焦距系列，规定如下：

20～35、24～50、24～120、28～70、28～80、28～200、35～70、35～80、35～105、70～210、70～300、80～200毫米。

我国部颁JB2384-78标准，对电影摄影用摄影镜头的焦距系列作了明确规定，见表3—1和表3—2所示。

在各种类型（即不同画幅尺寸）的照相机中，一般把焦距值与所摄画幅对角线相接近的那一摄影镜头，称为该类型照相机的**标准焦距摄影镜头**，简称**标准镜头**、**标头**。

例如：6×6规格的120照相机，其所拍摄的画幅尺寸为56毫米×56毫米，画幅对角线长度为79.20毫米，故一般把焦距为80毫米的摄影镜头，称为6×6类型120照相机的标准镜头。

又如：6×7规格的120照相机，其所拍摄的画幅尺寸为56

表 3—1 电影定焦距摄影镜头系列

35 毫米电影摄影用（单位：mm）		16 毫米电影摄影用（单位：mm）
优选系列	非优选系列	
16	18	8
20	25	10
28	35	16
40	50	25
85	75	50
150	100	100
300	800	300
600	1500	500
1000		1000
2000		

表 3—2 电影变焦距摄影镜头系列（单位：毫米）

35 毫米电影摄影用		16 毫米电影摄影用		8.75 毫米电影摄影用	
变焦距范围	变焦倍率	变焦距范围	变焦倍率	变焦距范围	变焦倍率
20 ~ 100	5 ×	9.5 ~ 57	6 ×	6 ~ 60	10 ×
25 ~ 125	5 ×	12.5 ~ 75	6 ×	9 ~ 36	4 ×
20 ~ 120	6 ×	12.5 ~ 100	8 ×	9 ~ 54	6 ×
25 ~ 250	10 ×	9.5 ~ 95	10 ×		
25 ~ 500	20 ×	12 ~ 120	10 ×		
20 ~ 200	10 ×	10 ~ 150	15 ×		
		12 ~ 240	20 ×		

毫米 × 68 毫米，画幅对角线长度为 88.09 毫米，故一般把焦距为 90 毫米的摄影镜头，称为 6 × 7 类型 120 照相机的标准摄影镜头。

同理，6 × 9、6 × 12、6 × 17 类型的 120 照相机，其标准摄影镜头的焦距，分别为 100、135、180 毫米；4″ × 5″、5″ × 7″类型的大型专业照相机，其标准摄影镜头的焦距分别为 150、210 毫米。

参见表 3—3 中所示。

表 3—3　　各种类型照相机之标准摄影镜头的焦距

照相机类型	35mm	6×4.5cm	6×6cm	6×7cm	6×9cm
标准镜头焦距	50mm	70mm	80mm	90mm	100mm
照相机类型	6×12cm	6×17cm	4″×5″	5″×7″	8″×10″
标准镜头焦距	135mm	180mm	150mm	210mm	300mm

在表 3—3 中，唯独 35 毫米照相机之标准镜头的焦距值，与所摄画幅对角线长度之间相差较大——该照相机所拍摄的画幅尺寸为 36 毫米×24 毫米，即其画幅对角线长度为 43.27 毫米，而其标准镜头的焦距却规定为 50 毫米。具体原因如下：世界上第一台 135 照相机为德国莱兹公司于 1925 年生产的莱卡照相机，并因其小巧玲珑、便于操作在全世界产生了轰动效应。而当时莱兹公司为了在较小的画幅上获得略大尺寸的影像，在莱卡照相机上所设计的配套摄影镜头之具体焦距值为 50 毫米。于是，世界上各照相机厂家在纷纷仿制莱卡 135 照相机的同时，均沿用了莱卡照相机的镜头焦距配置，故此，摄影界习惯称 50 毫米焦距的摄影镜头为 35 毫米照相机标准镜头。由于 50 毫米焦距摄影镜头的视角较窄，近年来有人把焦距为 40 毫米甚至 35 毫米左右的摄影镜头视为 35 毫米袖珍照相机的标准镜头。

已知单只人眼的明视场近似呈椭圆形，其水平视角为 30°，垂直视角为 22°，

在各种类型（即不同画幅尺寸）的电影摄影机中，传统上，一般将所摄画幅对角线像角与人眼明视场水平视角（30°）相接近的那个焦距的摄影镜头，称为该类型之电影摄影机的**标准焦距摄影镜头，简称标准镜头、标头。**

故此，过去电影摄影界分别称焦距为 50 毫米（对角线像角为 30°23′）与 25 毫米（对角线像角为 28°03′）的摄影镜头，依次为 35 毫米与 16 毫米电影摄影机的标准镜头。又因为上述标准镜

头的焦距值刚好接近所摄电影画幅对角线长度的2倍，故过去电影界又称焦距值为画幅对角线长度2倍的电影摄影镜头为标准摄影镜头①。参见表3—4中所示。

世界一些现代著名电影摄影师普遍认为，既然人眼明视场的水平视角为30°，因而只有运用水平视角为30°的摄影镜头所拍摄之画面的透视效果，才与人眼现场观看到的实际透视效果相吻合。故此现代电影摄影师普遍认为，应把所摄画幅水平像角与人眼明视场水平视角（30°）相接近的那个焦距的摄影镜头，称为该类型之电影摄影机的**标准焦距摄影镜头**，简称**标准镜头**。

于是，近代电影摄影界分别称焦距40毫米（水平视角为30°40′）、19毫米（水平视角为29°38′）与23毫米（水平视角为29°56′）的摄影镜头，依次为35毫米、16毫米与超16毫米电影摄影机的标准摄影镜头。参见表3—4中所示。

表3—4　　电影摄影机之标准摄影镜头的焦距值

电影摄影机类型	35mm	16mm	超16mm
传统规定的标准镜头焦距	50mm	25mm	
近年认同的标准镜头焦距	40mm	19mm	23mm

在各种类型（即不同靶面尺寸）的电视摄像机中，传统上，一般也把所摄画幅对角线像角与人眼明视场水平视角（30°）相接近的那个焦距的摄影镜头，称为该类型之电视摄像机的标准焦

① 照相机与电影摄影机关于标准镜头定义的差异（35毫米普通电影画面尺寸尚不足35毫米照相画面的一半，而二者均以50毫米为标准镜头的焦距），是因为照相机一般是通过一幅固定画面来完整地展现一被摄景物，且观众也可从容不迫地依次欣赏一幅画面中的各个局部，为了能更全面、更形象地说明创作思想，就希望摄影镜头的视角更大些；而电影摄影机可通过摇、推、拉、跟、移、升降等运动摄影方法来依次展现被摄景物的方方面面（如欲表现一幅横幅画卷，摄影机可自左至右地移动着将其全貌依次拍摄下来），并可利用蒙太奇手法，此外电影画面要求高度吸引观众注意力，故此标准镜头的视角较照相机为小。

距摄影镜头，简称标准镜头、标头。故此，1″、2/3″、1/2″、1/3″规格之诸电视摄像机，对其标准镜头的焦距依次规定为30毫米（对角线像角为29°52′）、20毫米（对角线像角为30°45′）、15毫米（对角线像角为29°52′）、11毫米（对角线像角为30°31′）。参见表3—5中所示。

基于对所拍摄之画面透视效果的考虑，近年电视界也同样认为应该以所摄画幅水平视角为30°作为判断摄像机标准摄影镜头焦距的依据，故此认为1″、2/3″、1/2″、1/3″规格之诸电视摄像机，其标准镜头的焦距应依次为24毫米（水平视角为29°52′）、16毫米（水平视角为30°45′）、12毫米（水平视角为29°52′）、9毫米（水平视角为29°52′）。参见表3—5中所示。

表3—5　　常见电视摄像机类型之标准摄影镜头的焦距

电视摄像机类型	1″	2/3″	1/2″	1/3″
传统规定的标准镜头焦距	30mm	20mm	15mm	11mm
近年认同的标准镜头焦距	24mm	16mm	12mm	9mm

总之，在不同规格之照相机或不同规格之电影摄影机、不同规格之电视摄像机上，标准摄影镜头所指的焦距值并不相同。

此外，摄影界习惯于把比标准镜头焦距更短的摄影镜头称为短焦距摄影镜头，而把比标准镜头焦距更长的摄影镜头称为长焦距摄影镜头。显然，区别某摄影镜头具体为短焦距、标准或长焦距摄影镜头所依据的原则，从本质看，并非是镜头的焦距大小，而是其像角的大小；只有对供同一用途的同系列摄影镜头讲，摄影镜头的焦距大小才间接成为区分长、短焦距摄影镜头的依据。

二、像面定位距、后顶焦距、前顶焦距、主点间距、节点间距、光学长度、镜头长度

像面定位距 F·f 或 f_t（Flange Focal Distance at ∞），又音译为**法兰焦距**，也有人称为定位截距。像面定位距又分镜头像面定位距和机身像面定位距。

摄影镜头像面定位距指当摄影镜头对无限远（即 ∞）调焦时，自该摄影镜头与镜头座相配合的镜头筒轴向定位端面，至该摄影镜头理想成像平面（即像方焦平面）之间的距离，单位为毫米。变焦距摄影镜头的理想像平面应取其像面漂移范围的中间位置处。

电影摄影机、照相机（或电视摄像机）的**机身像面定位距**，指自该机身上的镜头座定位端面，至该机身内决定感光胶片轴向位置的曝光窗处胶片片道平面（或摄像管、CCD 靶面）之间的光学距离，单位为毫米。

机身上镜头座定位端面至机身内感光胶片乳剂平面之间的距离应与摄影镜头的像面定位距精确相等①。

过去，电影摄影机与照相机生产厂家认为，由于曝光窗后方的后压片板之压力作用的结果，摄影时感光胶片的乳剂平面紧紧地贴在曝光窗的胶片片道平面上，亦即机身内感光胶片乳剂平面与曝光窗片道平面精确重合，故此，为保证所拍摄之影像的高清晰度，传统电影摄影机与传统照相机的机身像面定位距应与其摄影镜头像面定位距彼此精确相等。

近年，电影摄影机与照相机生产厂家经过研究认为：由于曝

① 当摄影镜头后安装有分光棱镜时例外（参阅本书第二章第一节五中有关内容）。

光画幅中央的前方呈悬空状态，为实现既要尽可能把胶片压平展而又不至向前凸起，并且不至因压力过大而导致输片时划伤胶片的综合目的，所选择的后压片板的具体压力大小应适宜。而在此适宜压力下拍摄时，成像中的感光胶片的实际形状存在着画幅略微向后凹的现象。故此，现代电影摄影机与照相机一般将机身像面定位距设计得比镜头像面定位距略小。例如，德国生产的阿莱弗莱克斯 535 型 35 毫米电影摄影机的镜头像面定位距为 52 毫米，而机身像面定位距为 $51.98_{-0.01}$ 毫米。以确保拍摄时摄影镜头所结成的最清晰影像刚好落在感光胶片的实际乳剂平面处。

照相机、电影摄影机、摄影镜头厂家在生产中严格控制像面定位距精度的目的，主要是保证机身与摄影镜头的互换性：当把镜头座型号相同而焦距不同的摄影镜头先后安装到同一机身上、或把同一摄影镜头先后安装到镜头座型号相同而不同的机身上时，均可确保获得最佳成像质量。

电影摄影机像面定位距的制造公差早期多为 ±0.01mm（约相当于 ± 1/2500 英寸），现代同期录音电影摄影机多为 ±0.005mm（约相当于 ± 1/5000 英寸，如德国阿莱弗莱克斯 BL4S 型 35 毫米电影摄影机）或 -0.01mm。照相机像面定位距的制造公差早期多为 ±0.02mm，现代有的专业相机已达 ±0.01mm。

不同厂家所生产之照相机或电影摄影机的镜头座结构一般不同，因而其各自要求之摄影镜头的像面定位距值往往不等。常见照相机和常见电影摄影机的像面定位距值，见表 3—3 和表 3—4 中所示（表 3—3 中未注型号者均指八十年代新型单反相机）。

后顶焦距 B.f（Back Vertex Focal Distance，Image Vertex Focal Distance）。又称**像方顶焦距、后工作距、后截距、后镜端焦距**。后顶焦距指当摄影镜头对无限远调焦时，自摄影镜头最后一片透镜之后顶点，至该镜头像方焦点之间的距离，单位为毫米。

后顶焦距值的大小，决定了摄影镜头的后镜片与感光胶片平

表 3—3　　常见照相机的机身像面定位距

照相机名称	机身像面定位距(mm)	照相机名称	机身像面定位距(mm)
哈苏(Hasselblad)	74.9 ± 0.03	美能达(Minolta)7xi、α7000	44.7 ± 0.01
东风 120	74.8 ± 0.03	美能达(Minolta)α 9	44.7 ± 0.015
罗莱(Rolleiflex)6006	75	美能达(Minolta)9xi	44.725 ± 0.02*
长城 DF3(M39 × 1)	77.7 ± 0.05	爱克赛太(Exakta)	44.7
玛米亚(Mamiya)RB67	96.1	托普康(Topcon)D	44.7
罗莱(Rolleiflex)SL66	102.4	泽尼特(Зенит)3M	45.2
莱卡(Leica)M3、红旗 20	27.8 ± 0.02	宾得(Pentax)LX	45.5 ± 0.02
莱卡(Leica)、上海 58Ⅱ	28.8 ± 0.02	凤凰 JG303M、珠江 S207	45.5 ± 0.02
阿尔帕(Alpa)	37.9	理光(Ricoh)XR7	45.5 ± 0.02
基辅(Kiev)Ⅳ、尼康(Nikon)S	38.8 ± 0.02	启侬(Chinon)CP5	45.5 ± 0.02
柯尼卡(Konica)FT1	40.5 ± 0.02	考西娜(Cosina)CT7	45.5 ± 0.02
佳能(Canon)F1	42.1 ± 0.02	西格玛(Sigma)SA1	45.5 ± 0.02
富士卡(Fujica)、富士(Fuji)	$43.45^{+0.025}_{-0.015}$	西姆科(Cimko)	45.5 ± 0.02
美能达(Minolta)XD7	43.5 ± 0.02	米兰达(Miranda)	45.5 ± 0.02
海鸥 DF、孔雀 DF、珠江 S201	43.5 ± 0.02	雅西卡(Yashica)FX3	45.5 ± 0.02
宾得(Pentax)Z－1P	44.14	康太克斯(Contax)RTSⅡ	45.5 ± 0.02
佳能(Canon)EOS 1V	44.17	奥林巴斯(Olympus)OM4	46.0 ± 0.02
普拉蒂卡(Praktica)BC1	44.4 ± 0.02	尼康(Nikon)F5	46.5 ± 0.02
罗莱(Rolleiflex)3003、SL	44.5 ± 0.02	莱卡(Leica)R4	46.9 ± 0.02
玛米亚(Mamiya)ZE	44.5 ± 0.02		

表 3—4　　常见电影摄影机的像面定位距

机　　型	机身像面定位距	镜头像面定位距
"C"型镜头座		0.69 英寸 (17.526mm)
海鸥 S-16B	20.44 ± 0.01mm	0.69 英寸 (17.526mm)
红旗 S-16	$20.85^{+0.01}_{-0.02}$ mm	0.69 英寸 (17.526mm)
电影产品(CINEMA PRODUCTS)CP	38.1mm	38.1mm
阿通(AATON)	40 ± 0.0035mm	40mm
米曲尔(MITCHELL)NC、标准和快速纽尔(NEWALL)	1.695 英寸 (43.05mm)	1.695 英寸
埃克莱尔(ECLAIR)	48 ± 0.005mm	48mm
卡米弗莱克斯(CAMEFLEX)	48 ± 0.005mm	48mm
阿莱弗莱克斯(ARRIFLEX)BL Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、4	51.98 ± 0.005mm	52mm
阿莱弗莱克斯(ARRIFLEX)535	51.98 - 0.01mm	52mm
阿莱弗莱克斯(ARRIFLEX)ⅡA、ⅡB、ⅡC	52 ± 0.01mm	52mm
阿莱弗莱克斯(ARRIFLEX)16SR	51.99	52mm
和平 35Ⅱ	$52^{+0.01}_{-0.02}$ mm	52mm
米曲尔(MITCHELL)S35R	$2.25^{+0}_{-0.0005}$ 英寸 ($57.15^{+0}_{-0.0127mm}$)	2.25 英寸
潘纳弗莱克斯(PANAFLEX)	$2.25^{+0.0003}_{-0}$ 英寸 ($57.15^{+0.00762}_{-0}$ mm)	2.25 英寸
江光 1204	58 ± 0.013mm	58mm
米曲尔(MITCHELL)BNC 莫维康(MOVIECAM)	$2.42^{+0}_{-0.0005}$ 英寸 ($61.468^{+0}_{-0.0127mm}$)	2.42 英寸
上海 1101	61.65mm	61.65mm

面之间的空间大小。由于单镜头反光照相机要在胶片与摄影镜头之间安装反光镜，因此该类照相机所配备之摄影镜头的后顶焦距值较大。例如，国产海鸥 DF 型 135 照相机，要求所安装之摄影镜头的后顶焦距应大于 38.5 毫米；东风牌 120 单镜头反光照相机，要求所配套之摄影镜头的后顶焦距应大于 68.5 毫米。同理，通过反光遮光器取景之电影摄影机，也要求所配套之摄影镜头必须具有较大的后顶焦距（35 毫米电影摄影机一般应≥27mm，16 毫米电影摄影机一般应≥18mm）。

前顶焦距（Front Vertex Focal Distance，Object Vertex Focal Distance），又称**物方顶焦距**。前顶焦距指自摄影镜头最前一片透镜之前顶点，至该镜头物方焦点之间的距离，单位为毫米。

前顶焦距值的大小，决定了为获得同样影像放大率时（设镜头焦距 f 相同），摄影镜头前镜片与被摄物平面间的空间大小。故前顶焦距较大时，若从事近摄工作，则可便于对被摄体进行布光和不易妨碍被摄昆虫的自然活动；但若从事翻拍工作，则需较高的翻拍架。

主点间距（Distance of Main Planes），又称**主平面间距**。主点间距指物方主点 H 与像方主点 H′之间的距离，单位为毫米。若物方主点在左方，像方主点在右方，则主点间距为正值，反之为负值。

节点间距（Nodal Point Separation）。节点间距指物方节点 N 与像方节点 N′之间的距离，单位为毫米。由于普通摄影时 H 与 N、H′与 N′彼此位置重合，故有些光学工厂在技术资料中常用节点间距取代主点间距。

光学长度（Lens Optical Length）。光学长度指摄影镜头第一片透镜前顶点，至最后一片透镜后顶点之间的距离，单位为毫米。光学长度愈短，摄影镜头的体积愈小，就愈易于携带和使用。也有的光学厂家在资料中不标示光学长度，而标示摄影镜头

前顶点至像方焦点之间的距离（其等于光学长度与后顶焦距之和），或标示焦点间距（其等于光学长度与后顶焦距、前顶焦距三者之和）L_{FF}'。

镜头长度（指产品目录上所标示的 Length）。一些厂家指当调焦至无限远时，镜筒轴向定位端面至镜筒前端面之间的距离（显然该值比整个镜筒全长要短一些）；也有一些厂家指当调焦至无限远时，胶片平面至镜筒前端面之间的距离（显然该值比整个镜筒全长要长一些）；还有少数厂家指当调焦至无限远时的镜筒全长。

摄远比（テレ比）。指摄影镜头光学全长/焦距。摄远比愈小，表示该摄影镜头愈微型化。例如佳能 EF 1200F5.6L 型摄影镜头的摄远比已达 0.7。

三、像场、像角与视角

把摄影镜头安装在一很大的伸缩暗箱前端，并在该暗箱后端安装一块很大的磨砂玻璃。当将摄影镜头光圈开至最大，并对无限远景物调焦时，可以发现，在磨砂玻璃上呈现出的影像均位于一圆形面积之内，而此圆形之外则漆黑、无影像。此有影像的圆形面积为该摄影镜头的**最大像场**。在该最大像场范围的中心部位，有一能使无限远景物结成清晰影像的区域，称为**清晰像场**，而在此清晰像场与无影像区域之间所夹的圆环形区域内，虽有无限远景物的影像，但较模糊。如图 3—1 所示。

如果将摄影镜头的光圈逐渐收小，则可发现上述清晰像场的面积在逐渐向外扩大。当光圈开至最大时的清晰像场范围称为**基准清晰像场**。显然，照相机或摄影机曝光窗应位于此基准清晰像场之内。曝光窗所在区域称为**有效像场**。

供普通 135、120 照相机使用之摄影镜头的基准清晰像场一

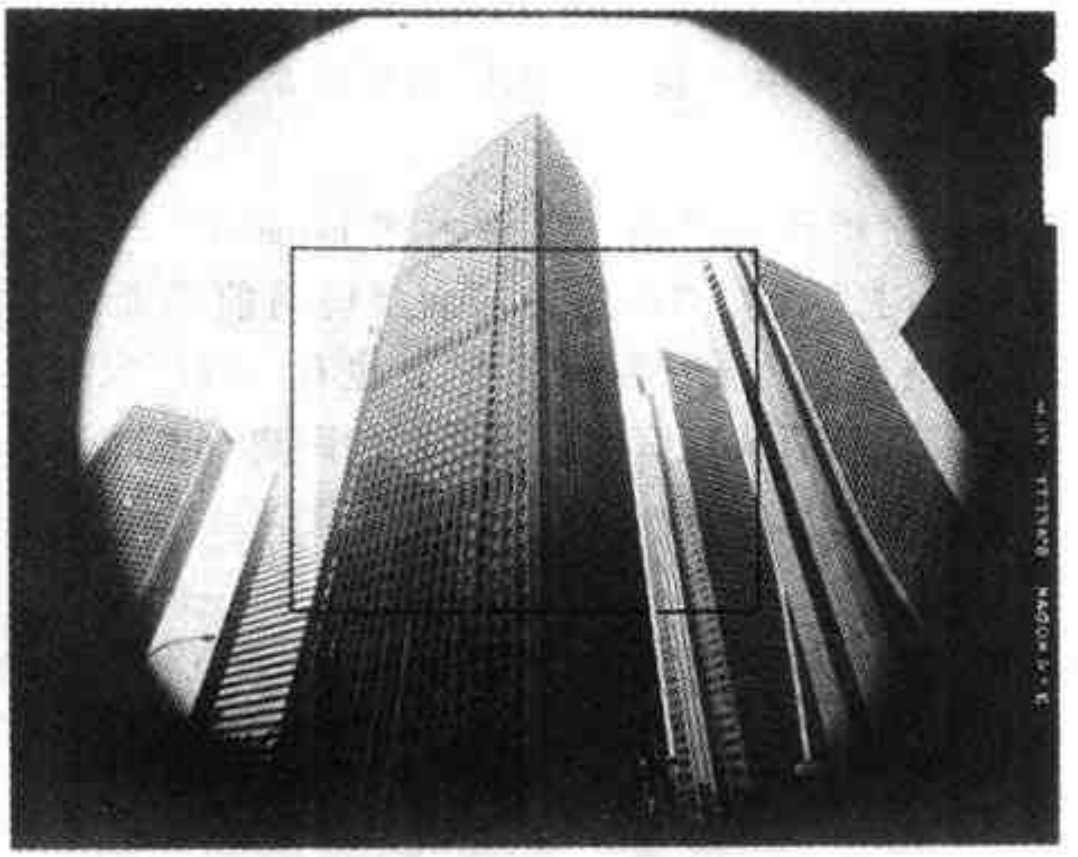


图 3—1　最大像场与清晰像场

般仅略大于其有效像场，以便下降制造成本。而供大型专业照相机上使用的摄影镜头，其基准清晰像场范围均远远大于其有效像场范围，以便当照相机做透视调整时，曝光窗能仍保持在该清晰像场范围之内（否则将影响所摄影像质量）。参见图 3—2 所示。图中黑粗线矩形框为有效像场，圆内的面积为基准清晰像场。

当摄影镜头对无限远处调焦时，过该镜头光轴的平面，必与有效像场边缘交于两点，自该两点分别向摄影镜头像方节点引线段，则两线段与像方节点所成的夹角，即自像方节点向有效像场边缘的张角，称为该摄影镜头的**有效像场角**，简称**像角**（Image Angle）用字母 θ 标示，或用 2ω′、2W′标志（一般常用 ω′或 W′表示半像角）。

由于普通摄影时，摄影镜头前后两侧均为空气，即摄影镜头像方节点 N′与像方主点 H′彼此重合，故此有些光学专著称“当调焦至无限远时，自摄影镜头像方主点 H′至有效视场边缘两对

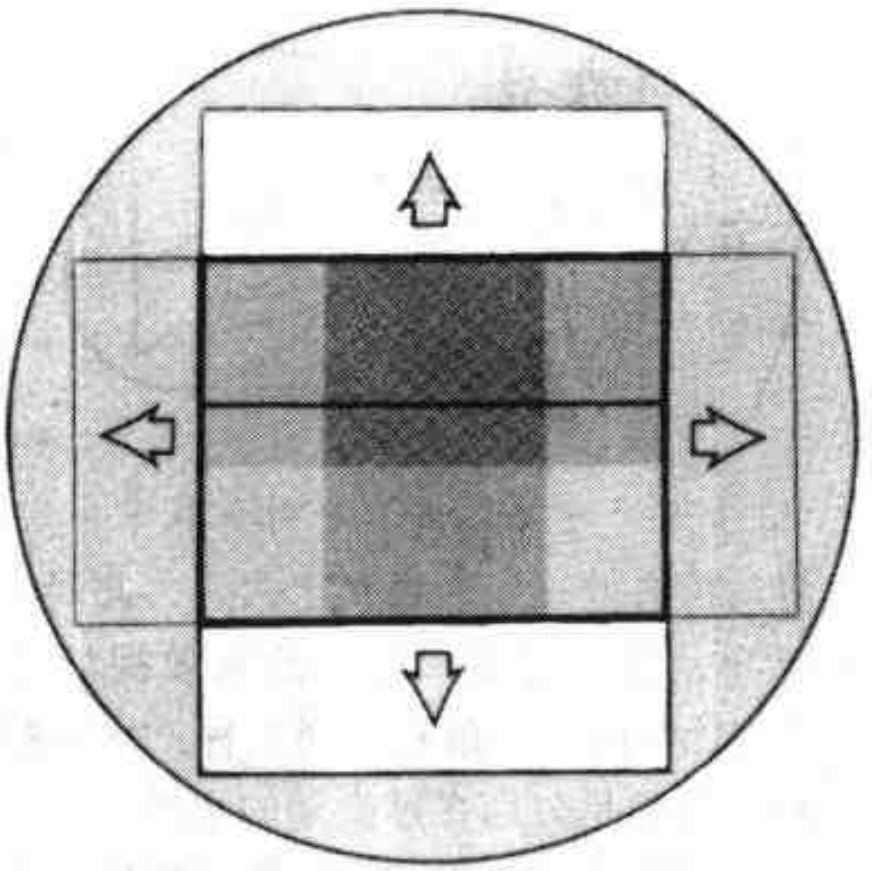


图 3—2　有效像场与基准清晰像场

应边（或两对应角）所夹的角为像角"。

由于照相机的曝光窗一般为长方形（或正方形）的，所以对于同一摄影镜头和曝光窗，度量的方法不同，所获得的有效像场角数值将不同。常用的有效像场角有下述几种：

1）**水平像角** $\theta_{水}$：在过光轴的水平面上度量时，所获得的有效像场角。

2）**垂直像角** $\theta_{垂}$：在过光轴的铅垂平面上度量时，所获得的有效像场角。

3）**对角线像角** $\theta_{对角}$：在过光轴和曝光窗对角线的倾斜平面上度量时，所获得的有效像场角。

参见图 3—3 中所示。

当摄影镜头对无限远调焦时，该摄影镜头在照相机或电影摄影机内的胶片上，所能清晰拍摄下来的景物范围，即摄影镜头实际成像时所涵盖的景物空间范围，称为该摄影镜头的有效视场。

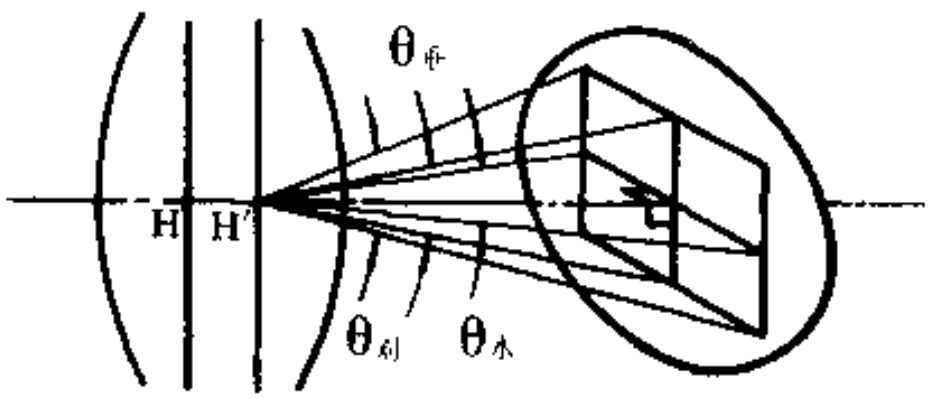


图 3—3　水平、垂直和对角线像角

过光轴的平面将与该有效视场边缘交于两点，此两点与摄影镜头物方节点间的夹角，称为此摄影镜头的**有效视场角**，简称**视角**（Angle of View 2ω）。常用的视角有下列三种：**水平视角**、**垂直视角**与**对角线视角**。它们是分别在过光轴的水平面、铅垂面和过光轴并过有效视场对角线的倾斜平面上，度量时所获得的。一般常用 ω 或 W 表示**半视角**。

基于普通摄影时摄影镜头物方节点 N 与物方主点 H 彼此重合的现象，有些摄影光学专著称“当调焦至无限远时，自摄影镜头物方主点 H 至有效视场边缘两对应边（或两对应角）所张的角为视角”。

当摄影镜头位于空气介质之中时，普通摄影镜头的水平视角、垂直视角、对角线视角的数值，一般分别与该镜头的水平像角、垂直像角和对角线像角相等（某些摄影镜头如鱼眼镜头、变形宽银幕电影摄影镜头、透视调整摄影镜头例外，视角大于像角）。

由于视角是摄影镜头所能清晰拍摄下的景物空间角度，所以摄影镜头的视角愈大，则照相机或摄影机所拍摄下的景物范围也就愈大。例如，在同一拍摄点，若用视角为 100°的摄影镜头，刚好能拍摄全部被摄景物，则改用视角为 50°的摄影镜头后，就只能拍摄下该被摄景物的四分之一了。

供大型专业照相机使用的摄影镜头，一般还在技术资料内提供该摄影镜头在全开光圈和 f/22（Full Aperture & f/22）下的**像场直径**（Image Circle Diameters）及照相机调节范围（Permissible Camera Movements），单位均为毫米（参见作者著《摄影镜头的使用技巧》一书中表 7—1、表 7—2、表 7—3 中所示）。

四、焦距与视角间的关系

在普通摄影时（即当摄影镜头位于空气介质中时），照相机和电影摄影机之普通摄影镜头对角线视角 $\theta_{对角}$ 的计算公式如下（某些特殊摄影镜头如鱼眼摄影镜头、变形宽银幕电影摄影镜头等例外）：

$$\theta_{对角} = 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{L}{2f'} \qquad (3—1)$$

式中 L 为所摄画幅的对角线长度，单位为毫米

f' 为摄影镜头的焦距，单位为毫米。

摄影镜头水平视角 $\theta_{水}$ 的计算公式如下：

$$\theta_{水} = 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{b}{2f'} \qquad (3—2)$$

式中 b 为所摄画幅的宽度，单位为毫米。

摄影镜头垂直视角 $\theta_{垂}$ 的计算公式如下：

$$\theta_{垂} = 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{h}{2f'} \qquad (3—3)$$

式中 h 为所摄画幅的高度，单位为毫米。

知道摄影镜头的视角后，可以获知在调焦物平面处所能拍摄下的景物范围。

例 1. 已知普通 135 照相机所装摄影镜头的焦距为 50 毫米，调焦物平面处的物距为 2 米，求该镜头的水平视角和垂直视角，

及在调焦物平面处所能拍摄下之景物范围的宽 B 和高 H。

解：由公式（3—2）知

$$\theta_{水} = 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{b}{2f'}$$

$$= 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{36}{2\times 50}$$

$$= 39°35'$$

由公式（3—3）知

$$\theta_{垂} = 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{h}{2f'}$$

$$= 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{24}{2\times 50}$$

$$= 26°59'$$

$$B = 2l \times \mathrm{tg}\frac{\theta_{水}}{2}$$

$$= 2\times 2\times \mathrm{tg}\frac{39°35'}{2}$$

$$= 1.44\ （米）$$

$$H = 2l \times \mathrm{tg}\frac{\theta_{垂}}{2}$$

$$= 2\times 2\times \mathrm{tg}\frac{26°59'}{2}$$

$$= 0.96\ （米）$$

由公式（3—1）、（3—2）、（3—3）可知，摄影镜头的焦距与视角成反比关系——摄影镜头的焦距愈短，则该镜头的视角就愈广，反之焦距愈长则镜头的视角就愈窄。因此，摄影界又把短焦距摄影镜头称为广角摄影镜头，把长焦距摄影镜头称为窄角摄影镜头。

摄影镜头焦距与像角间的关系如图 3—4 所示。

摄影镜头焦距与视角间的关系如图 3—5 所示。

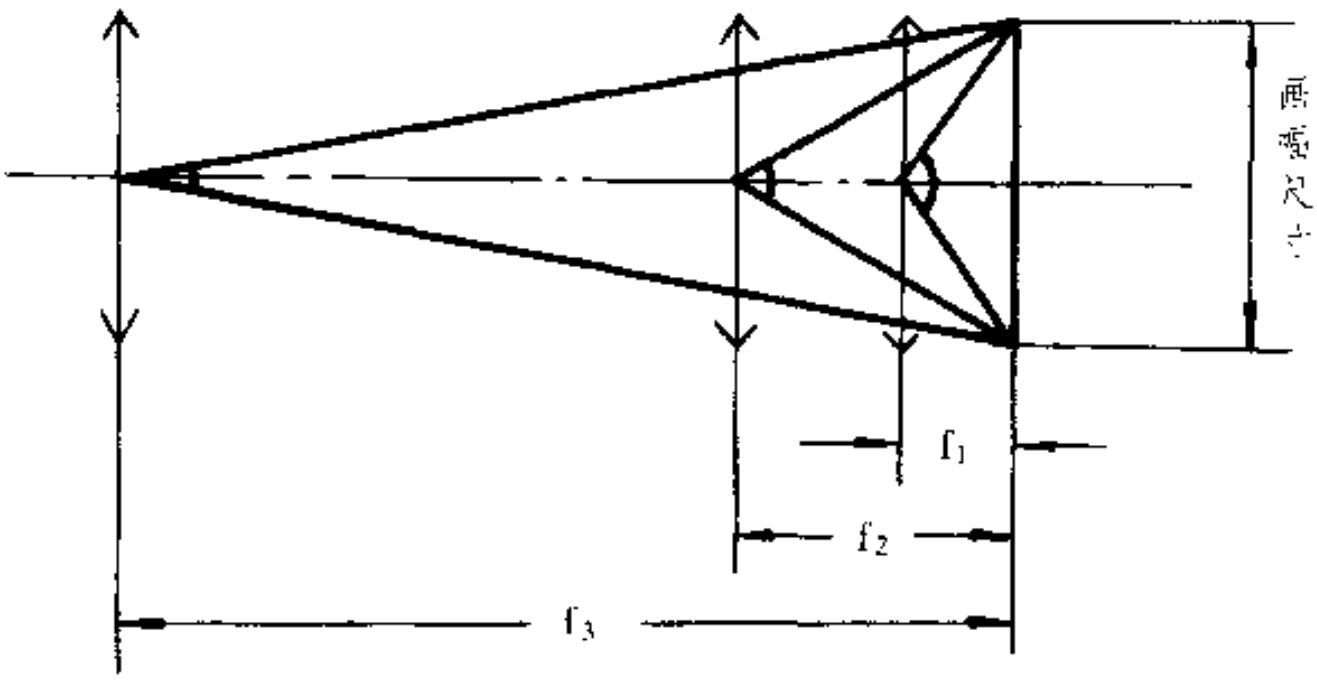


图 3—4　焦距与像角的关系

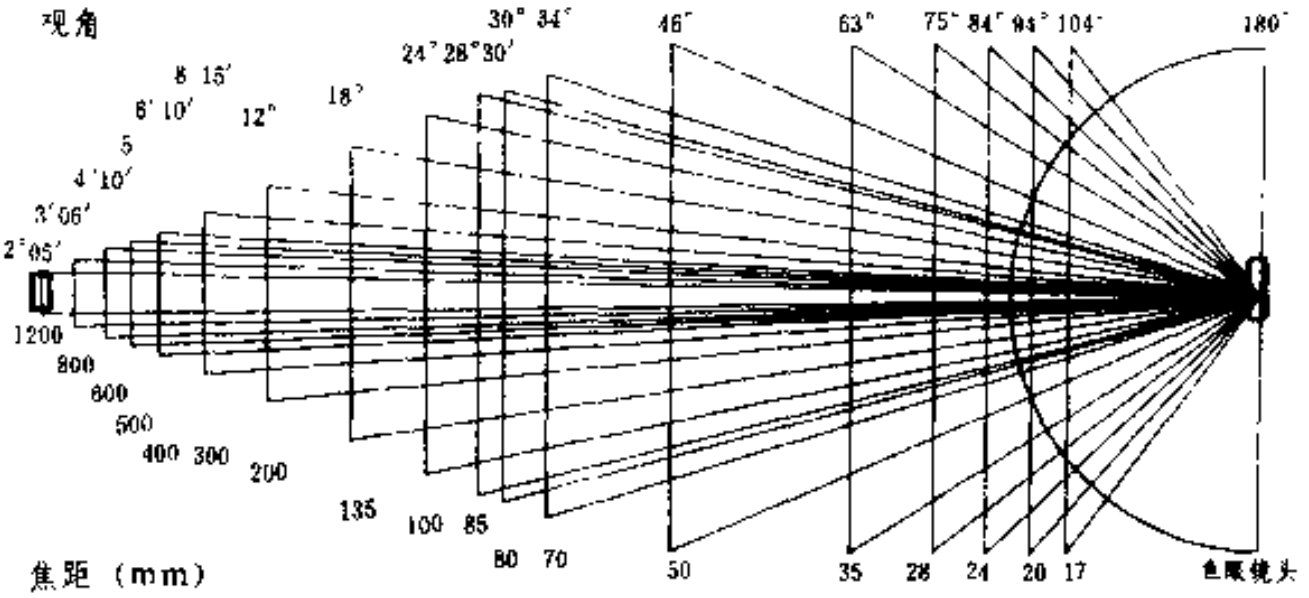


图 3—5　焦距与视角的关系

表 3—5 和表 3—6 分别列举了 135 照相机和 120 照相机摄影镜头的对角线视角。

表 3—7 列举了 35 毫米电影摄影机之摄影镜头的水平视角与垂直视角。

表 3—5 135 照相机摄影镜头的对角线视角

焦距 mm	对角线视角	焦距 mm	对角线视角	焦距 mm	对角线视角
13	118°	50	46°48′	400	6°12′
15	110°32′	85	28°34′	500	4°58′
18	100°29′	100	24°25′	600	4°08′
20	94°30′	105	23°18′	800	3°06′
24	84°04′	135	18°13′	1000	2°29′
28	75°23′	180	13°43′	1200	2°04′
35	63°27′	200	12°21′	1600	1°33′
40	56°49′	300	8°15′	2000	1°15′

表 3—6 6×6 型 120 照相机摄影镜头的对角线视角

焦距 mm	对角线视角	焦距 mm	对角线视角	焦距 mm	对角线视角
30	105°43′	80	52°41′	150	29°35′
40	89°26′	100	43°13′	250	18°01′
50	76°46′	120	36°32′	350	12°55′
60	66°51′	135	32°42′	500	9°04′

表 3—7 35 毫米电影用摄影镜头的水平视角与垂直视角

焦距 mm	16	18	20	24	25	28	32	35	40	50	75
水平视角	68°54′	62°45′	57°31′	49°09′	47°24′	42°48′	37°52′	34°49′	30°41′	24°46′	16°39′
垂直视角	53°08′	47°55′	43°36′	36°52′	35°29′	31°53′	28°04′	25°45′	22°37′	18°11′	12°11′
焦距 mm	85	100	135	150	180	300	600	800	1000	1500	2000
水平视角	14°43′	12°32′	9°18′	8°22′	6°59′	4°11′	2°06′	1°34′	1°15′	0°50′	0°38′
垂直视角	10°45′	9°09′	6°47′	6°06′	5°05′	3°03′	1°32′	1°09′	0°55′	0°37′	0°28′

第二节　相对孔径与光圈数

最大相对孔径是摄影镜头的另一重要技术性能指标。

一、光阑与光圈

光阑是摄影镜头、照相机、电影摄影机上，用以限制成像时光束大小与形状的装置。

在摄影镜头、照相机、电影摄影机上设置光阑的目的，是为了能够人为控制该镜头所能通过的光通量多少，以使像平面上获得适宜的照度，以及改善该镜头的成像质量，获得预期形状的画幅和体积合适的镜头。

光阑按作用分类，主要有孔径光阑、视场光阑、消杂光光阑。

孔径光阑是限制轴上物点成像光束圆锥角大小的光阑。在一定条件下，某些透镜的透镜框就是一个孔径光阑——凡光束中大于透镜框内孔直径而被透镜框阻挡的部分，均不参予成像。

在摄影镜头上，还专门设计有一个可改变其中央通光孔径大小的孔径光阑——光圈。

光圈一般由一组光圈叶片构成，该组光圈叶片共同形成了一个可以通过成像光线的光孔，此光孔与摄影镜头光轴垂直，光孔中心位于光轴上。调节摄影镜头上的光圈调节环，可以改变该光孔的直径大小，故此类光圈又称可变光阑。光圈的作用如下：控制摄影镜头所通过之光通量的大小、控制所摄画面景深大小、改善像质。光圈结构参见图 3—83 所示。

视场光阑是限制被摄物平面上或物空间中成像范围大小的光阑。在一定条件下，某些透镜的透镜框就是一个视场光阑——光

束中凡大于透镜框内径而被透镜框阻挡的部分。均无法参予成像。

在照相机和电影摄影机上，还专门设计有一个中央开有方形（矩形或正方形）通光孔的视场光阑——曝光窗。该曝光窗平面与摄影镜头光轴重直，曝光窗中心位于光轴上。

消杂光光阑是限制非成像杂光，使之不能通过摄影镜头到达成像平面的光阑。参见 5—15 中的 1 与 3 所示。消杂光光阑不限制成像光束。摄影镜头镜筒内表面上车制出的内螺纹（该内螺纹上涂有无光黑漆或经氧化煮黑处理），也起消杂光作用。

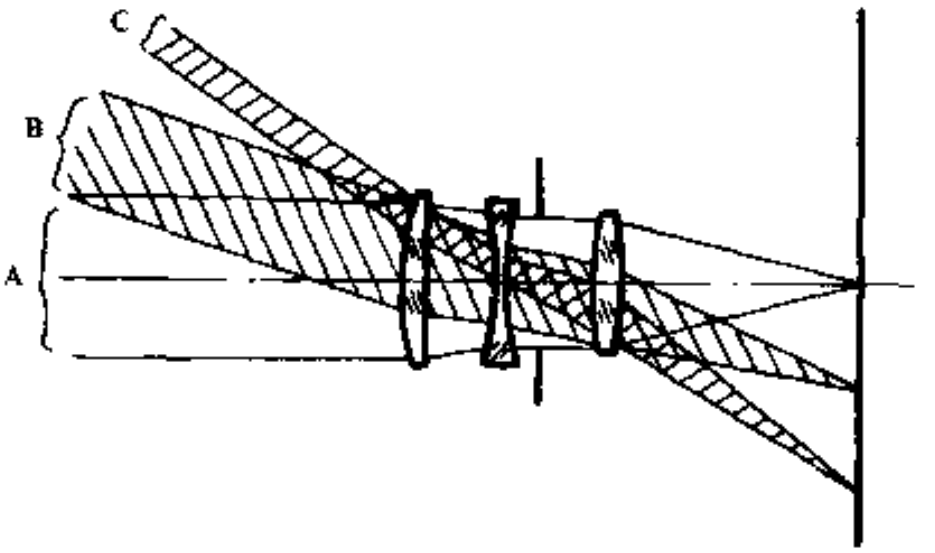
光圈上的光孔通过它前面的那些透镜片，在该摄影镜头物方空间所结成的影像，称为该摄影镜头的入射光瞳，简称**入瞳**。

光圈上的光孔通过它后方的那些透镜片，在该摄影镜头像方空间所结成的影像，称为该摄影镜头的出射光瞳，简称**出瞳**。

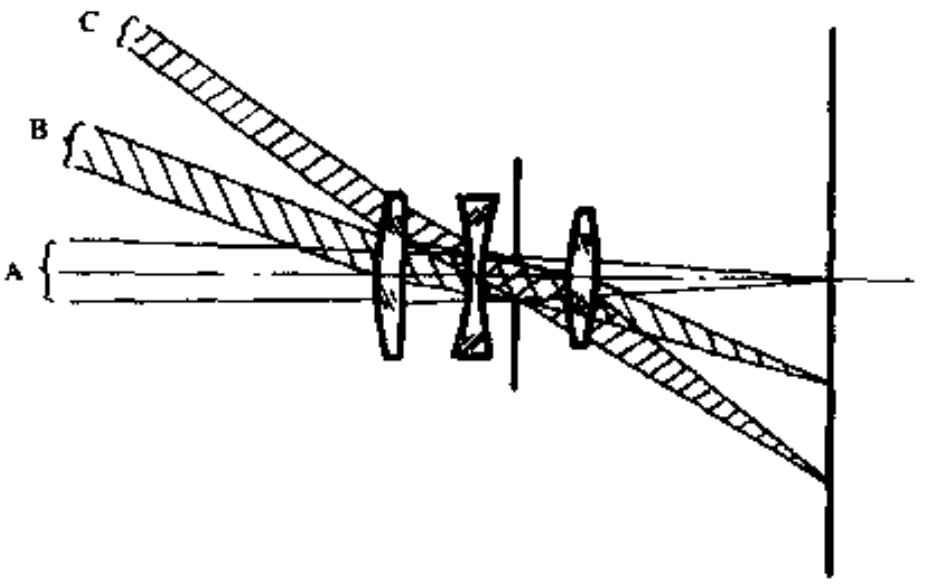
入射光瞳与出射光瞳互为共轭，即出瞳是入瞳经摄影镜头所结成的像。当光圈位于摄影镜头的像方空间时（如镜后程序快门），光圈本身就是出射光瞳。某些摄影镜头的光学结构以光圈为对称，则其入射光瞳和出射光瞳将分别位于该镜头光圈的前、后两侧。

光轴上物点向摄影镜头发出的充满光圈上之通光孔径的成像光束，即轴上物点之成像光束，不受透镜框与镜筒的限制与阻拦。如图 3—6a 中 A 光束所示。

当轴外物点的主光线与光轴的夹角达到一定数值后，该轴外物点向摄影镜头发出的倾斜光束，将会受到透镜框和镜筒等的限制与阻拦，以至无法充满光圈上的通光孔径，即轴外物点的实际成像光束截面积将小于轴上物点的成像光束截面积（见图 3—6a），从而使像平面上出现像场边缘照度比像场中心照度明显减弱的现象，此现象称为**渐晕**。显然，轴外物点与光轴的夹角愈大，则其渐晕也将愈大。



a.



b.

图 3—6　渐　晕

收小光孔时渐晕将有所减轻（参见图 3—6b 所示）。

渐晕的程度一般用**渐晕系数** C_D 表示

$$C_D = \frac{D_\omega}{D} \qquad (3—4)$$

式中D 为轴上物点之成像光束直径

D_ω 为当轴外物点之主光线与光轴的夹角为 ω 角时，在过该

物点和光轴的截面内，该物点所发出之实际成像光束的宽度。

为了减小摄影镜头的体积（以便于携带），一般摄影镜头均存在或大或小的渐晕现象。摄影镜头所允许之视场边缘的渐晕系数，通常不小于50%，即允许位于视场边缘之物点的成像光束被拦截约一半。

单镜头反光照相机的镜头出瞳若与取景器的入瞳配合不好，则将使取景视场照度不均匀（如部分视场变暗），从而影响调焦工作。

二、相对孔径与像平面照度

摄影镜头的**相对孔径**，指该摄影镜头的入射光瞳直径 D_A（若入射光瞳为多边形则指与其等面积之圆的直径，此圆又称有效孔径）与焦距 f' 之比。

$$\text{相对孔径} = \frac{D_A}{f'} \tag{3—5}$$

摄影镜头的入射光瞳直径 D_A 的求法如下：把摄影镜头光圈调节环调至某一刻度下，在摄影镜头像方焦平面处放置一块不透光黑色薄板，板中央开一小针孔（直径 $< f'/150$），使针孔刚好位于镜头像方焦点处，并在小针孔后方放置一只灯炮。灯光穿过针孔投射到摄影镜头的后镜片上，然后通过位于光圈叶片后方的各透镜，把光圈叶片照亮。光线穿过光圈叶片中央的光孔，继续前进——通过光孔前方的各透镜，向镜头前方射出。由于被照亮的小针孔相当于是一个位于像方焦点处的“点光源”，故摄影镜头向前方射出的必将是一束平行光束。在镜头前端靠近前镜片处垂直放置一磨砂玻璃，透过镜头的光线将在该磨砂玻璃上投影出一亮光斑。此光斑就是光圈上的光孔通过它前面的那些透镜片，在

该摄影镜头物方空间所结成的影像。此光斑直径即为该光圈位置下（即该光圈刻度下）的入射光瞳直径（若光斑为多边形则应求出其有效孔径）。如图 3—7 所示。入瞳直径一般比摄影镜头第一片透镜的直径要小，又比摄影镜头上光圈的实际孔径为大，即其尺寸介于二者之间。

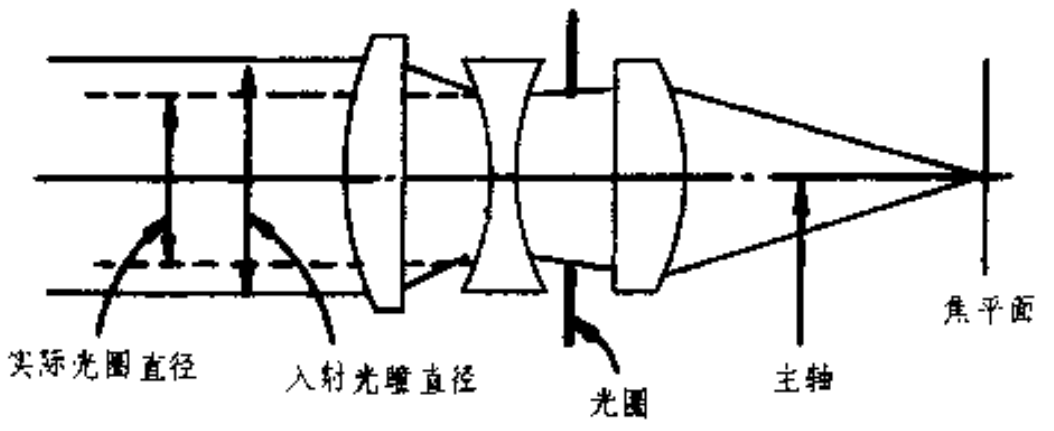


图 3—7　入射光瞳直径

将镜头光圈上的光孔开至最大，可获得最大入射光瞳直径。

摄远型摄影镜头的入射光瞳直径比出射光瞳直径大，而反摄远型摄影镜头正好相反，入射光瞳直径比出射光瞳直径小。

调节摄影镜头的光圈调节环，使光孔开至最大位置时的相对孔径，即最大入射光瞳直径与摄影镜头焦距的比值，称为该摄影镜头的**最大相对孔径**。

摄影镜头的最大相对孔径一般标示在该摄影镜头的前镜片压圈上，或镜筒外圆周上，并与焦距值标示在一起。为了便于进行比较和刻写，一般把最大相对孔径化简（约分）为分子是 1 的比例数。例如，当摄影镜头前压圈上标示为 1:1.2 或 f/1.2 时，即表示该摄影镜头的最大相对孔径为 1:1.2。此时在 1:1.2 中，1 并不表示是最大入射光瞳直径，1.2 也不表示是焦距，此比例数仅表示最大入射光瞳直径与焦距的比值而已。又如，长城 DF-3 型 120 照相机之 90mm 镜头的设计焦距为 89.6mm，最大入瞳直径

为 25.6mm（光圈叶片围成的实际通光孔直径为 20mm），故该镜头的最大相对孔径为 1:3.5（25.6:89.6）。

摄影镜头相对孔径的大小直接决定着由景物投射来的光线，在通过摄影镜头时的光通量大小，从而决定着像平面处所受到的照度高低。相对孔径大小所引起的像平面处的曝光量变化，可用房间内“与窗户相对之墙壁处的明亮程度”作形象的比喻：入瞳直径的大小好比窗户的大小，焦距的长短好比房间的深浅，显然，窗户愈大，房间愈浅，与窗相对之墙壁处就愈明亮。

总之，摄影镜头的最大相对孔径愈大，该摄影镜头的透光能力就愈强，从而使同一被摄物体能投射到成像平面处的最大照度也愈大。这对在低照度下、即较暗环境下拍摄非常有利，但其成本也必将相对较高。摄影界一般把最大相对孔径大于 1:2 的摄影镜头，称为快速镜头。电影界一般把最大相对孔径等于或大于 1:1.2 的摄影镜头称为大孔径镜头。

在同档次的摄影镜头中，焦距愈长者，其最大相对孔径一般相对愈小（因愈不容易制作）。

有些摄影镜头的前镜头压圈上或镜筒外圆周上所刻印的最大相对孔径为一确定数值（如 1:1.2、1:2），也有的为一可变数值（如 1:4.5—5.6、1:3.8—5.6），前者为稳定式最大相对孔径，一般多采用在专业档或准专业档摄影镜头上，后者为漂移式最大相对孔径，一般多采用在中档或普及档摄影镜头上（详见下述稳定式光圈与漂移式光圈）。

三、F 数（f/数）

相对孔径的倒数称为**光圈数**，也称光圈系数，又称镜头的“F 数”。

$$\text{F 数} = f' / D_\lambda \tag{3—6}$$

式中f'为焦距

D_z为入射光瞳直径（若入瞳为多边形则按等面积之圆的直径计算）

上式所求得的光圈数又称 F 制光圈数。光圈数一般用 F 数（即 FNo）或 f/数表示，如 F8 或 f/8。

有人误认为光圈数等于摄影镜头的焦距与第一片透镜直径之比，或误认为光圈数等于摄影镜头的焦距与镜头内的光圈孔径之比，这在理论上是不妥的。用这种观点无法解释下述现象：某些变焦距摄影镜头在第一片透镜直径和光圈孔径均不变的情况下连续变焦——改变焦距值，而其光圈数大小却始终能保持不变。

由公式（3—6）可知，若某摄影镜头的焦距固定，则光圈数与入射光瞳直径成反比关系。

已知圆的面积 A 为

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

即圆的面积与直径的平方成正比关系

若把上式两端同乘以 2，则该等式仍成立

$$A \times 2 = \frac{\pi}{4} d^2 \times 2$$

即

$$2A = \frac{\pi}{2} (\sqrt{2}\mathrm{d})^2 \qquad (3—7)$$

因此，圆的直径每增大为$\sqrt{2}$（即 1.4142136）倍，则该圆的面积就增大为 2 倍。

由于摄影镜头所能通过的光通量大小，与入射光瞳的面积成正比关系，因此该光通量的大小与入射光瞳直径的平方成正比关系，从面与光圈数的平方成反比关系。显然，光圈数每减小为原来的 $1/\sqrt{2}$（即 1/1.4142136），入射光瞳直径就增大为$\sqrt{2}$（即 1.4142136）倍，入射光瞳的面积就增大为 2 倍，摄影镜头的光

通量也就增大为二倍，从而使像平面处的照度和胶片乳剂面的曝光量也增大为二倍——曝光量增大一级。反之，光圈数每增大到$\sqrt{2}$（1.4142136）倍，则曝光量就减小为原来的1/2，即曝光量减小一级。

常见光圈数的系列，正是基于上述原理，由下述公式计算出的

$$F = 2^{\frac{m}{2n}} \qquad (3—8)$$

式中：m 为任意的整数（即正或负整数）

n 为1、2、3，分别表示第1系列、第2系列、第3系列（第1系列表示求出的F数系列中相邻两挡的通光量相差1级即1*EV*值；第2系列表示求出的F数系列中相邻两挡的通光量相差1/2级即1/2级*EV*值；第3系列表示求出的F数系列中相邻两挡的通光量相差1/3级即1/3级*EV*值）。

当 n 取第1系列，并用字母 *AV* 取代字母 m 时，公式（3—8）变为下列形式

$$F = (\sqrt{2})^{AV} \qquad (3—9)$$

式中 *AV* 称为光圈指数，仍为任意的整数（即正或负整数）。

国家标准GB9190-88中规定，光圈的名义F数与实测F数之比应不小于95%，并规定了F数的允许极限偏差δ（以EV值表示），见表3—8中所示。

根据公式（3—9）计算结果而标定的各挡光圈数的数值如下：1、1.4142136、2、2.8284127、4、5.6568542、8、11.3137088、16、22.6274176……。显然，上述系列不便于刻在摄影镜头上。

为使光圈数简明易算，便于刻制，需对上述计算结果中的小数值进行圆整，于是获得目前世界各国通用的**F制光圈数**

的系列（该F制系列早期称为英美制，后于1910年在第三次国际摄影会议上获得通过）：

0.25，0.35，0.5，0.7，1，1.4，2，2.8，4，5.6，8，11，16，22，32，45，64，90，128

表 3—8　　国际 GB9917-88 中允许的 F 数极限偏差

级别	入瞳直径 D（mm）	极限偏差 δ（EV）
Ⅰ	D > 3	±0.33
	3 ≥ D ≥ 1	±0.4
	D < 1	±0.5
Ⅱ	D > 7	±0.33
	7 ≥ D ≥ 3	±0.4
	D < 3	±0.5
Ⅲ	全部	±1

注：δ 意义为 $F = 2^{\frac{1}{2n}(m+\delta)}$

式中 m 为任意整数

n 为 1、2、3。

我国国标 GB9190-88 中，对摄影镜头上标记的 F 制光圈数的系列规定如下：

0.7，1，1.4，2，2.8，4，5.6，8，11，16，22，32，45，64，90，128

总之，F 制光圈数的标记系列具有下述特点：相邻两挡光圈数之间（如 2 与 2.8 之间）在数值上相差$\sqrt{2}$倍，曝光量相差一级；光圈数的数值愈大，摄影镜头的像场照度反而愈小；光圈数的数值每增大至$\sqrt{2}$倍，像场处的曝光量就减小一级，即曝光量就减小为原数值的 1/2；反之，光圈数的数值每减小为原数值的 1/

$\sqrt{2}$，像场处的曝光量就增大一级，即曝光量就增大为原数值的 2 倍。显然，相间两挡光圈数之间（如 F2 与 F4 或 F5.6 与 F11 之间），虽然在数值上相差 2 倍，但曝光量却相差 2 级——此特性有助于摄影者记忆上述光圈数之系列的各挡数值。

例如，哈苏 500C/M 型 120 照相机，其标准摄影镜头的焦距为 80 毫米，由公式（3—6）可知，当将光圈数调节至 F8 时，其入射光瞳直径为 10 毫米；当将光圈数调节至 F4 时，其入射光瞳直径为 20 毫米。由于 20 是 10 的二倍，故 F4 时的入瞳面积是 F8 时的 4 倍，因此，F4 时的光通量是 F8 时的 4 倍。如图 3—8 所示。

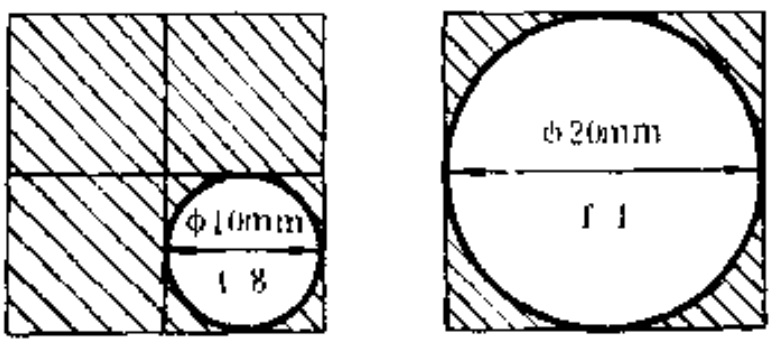


图 3—8　光圈数与入瞳直径和光通量

又如，光圈 F1.4 比光圈 F22 开大 8 级，故此 F1.4 时的光通量是 F22 时的 256 倍（$2^8 = 256$）。

光圈数的各挡数值一般刻在摄影镜头光圈调节环的外圆周上。摄影者欲选用某挡光圈数时，只需转动光圈调节环，使该挡数值与镜筒上的光圈基线对齐即可。如图 3—9 所示。

摄影界一般把光圈上的光孔直径往大调节，即把光圈数的 F 数值向小调节，称为开大光孔或开大光圈；把光孔直径往小调节，即把 F 数值向大调节，称为收小光孔或收小光圈。总之，摄影界习惯把小 F 数称为大光圈，把大 F 数称为小光圈。

调节变焦距摄影镜头的变焦环，可使该镜头的焦距值产生连续变化，由公式（3—6）可知，当摄影镜头的焦距改变时，必将

图 3—9　普通 F 数的调节

引起该镜头 F 数或入瞳直径 D_A 产生相应变化。根据变焦过程中镜头 F 数是否跟着产生相应变化，可将变焦距摄影镜头分为 F 数稳定式和 F 数漂移式两大类。

F 数稳定式变焦距摄影镜头上只有一条光圈基线，一旦将所需光圈数值调至与该光圈基线对正后，无论将镜头焦距变至哪一位置，该摄影镜头的光圈数值均可始终保持不变。此类 变焦距镜头为使 F 数稳定，在焦距增大（或减小）的同时，使入瞳直径也跟着成比例地增大（或减小），以资补偿。亦即此类镜头在变焦时可始终使焦距 f' 与入瞳直径 D_A 的比值保持不变。

F 数稳定式变焦距摄影镜头的设计和制造较复杂，成本较高，但便于摄影者操作使用。

F 数漂移式变焦距摄影镜头上有二条光圈基线，并用不同颜色标出，以资区别。这类镜头在改变焦距时，未能使入瞳直径作精确的同步补偿，于是焦距 f' d 与入瞳直径 D_A 之比值将随着焦距的改变而变化，从而使 F 数产生漂移现象。例如美能达 MD ZOO M35 ~ 105、1:3.5 ~ 4.5 的变焦距摄影镜头，其焦距标尺中的 35mm 挡用橙色标示，105mm 挡用黄色标示，两条光圈基线中较长一条用橙色标示，较短一条用黄色标示，如图 3—10 中 5 所示。当使用用橙色标示的 35 毫米焦距拍摄时，应依据橙色光圈

基线调节光圈数；当使用黄色标示的 105 毫米焦距拍摄时，应依据黄色光圈基线调节光圈数；当使用中间焦距值拍摄时，则应将所需光圈数调至上述二光圈基线之间的相应位置处。该镜头变焦至 35 毫米时的最大相对孔径为 1:3.5，当变焦至 105 毫米时最大相对孔径减小为 1:4.5。在某些摄影镜头上，二条光圈基线中的一条仍用较长的线条标示，而另一光圈基线改为用颜色不同的圆点标示。图 3—11 为日本尼柯 AF70～210mm 变焦距摄影镜头的光圈漂移曲线。

F 数漂移式变焦距摄影镜头的设计和制造较容易，成本较低，但因调焦时光圈数值跟着改变，故对摄影者带来诸多不便，尤其当使用外测光方式测光时（如使用独立式测光表时），在变焦后必须进行相应的补偿。

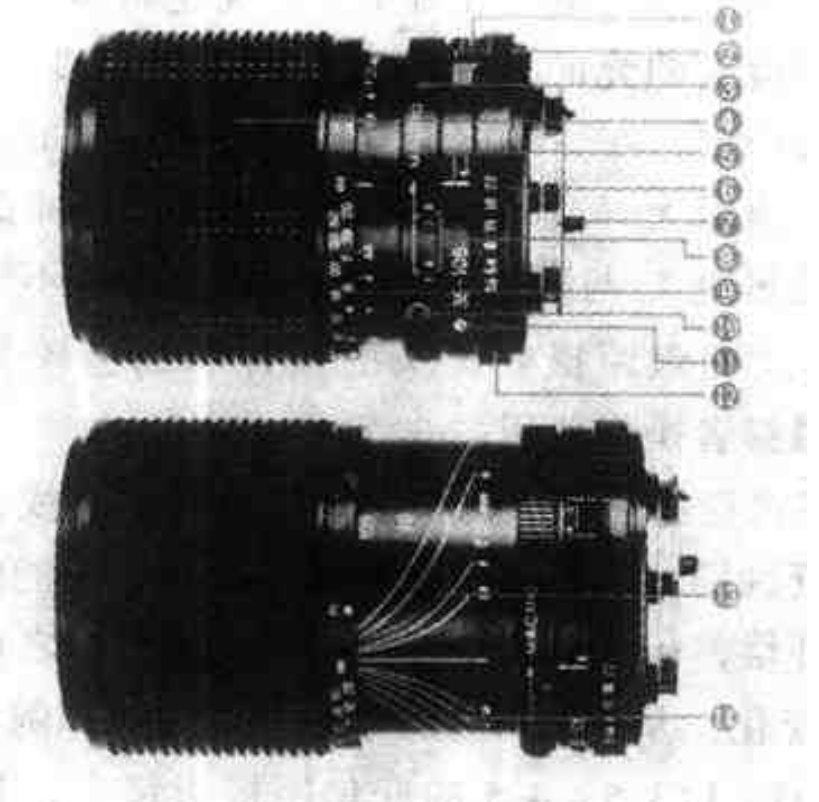


图 3—10 F 数漂移式的调节

为了更精确地进行曝光控制，摄影者常常对上述 F 制光圈数的系列加以更精细的划分：把每相邻两挡数值之间再划分为三等

分，其每相邻两小等分之间的光圈数，在数值上相差$\sqrt{2}$倍（即1.122倍），其曝光量相差1/3级（即1.26倍）。参见表3—9所示。还有人甚至把F制光圈数的系列中的相邻两挡数值之间，细分为六等分，每相邻两小等分之间的曝光量相差1/6级。

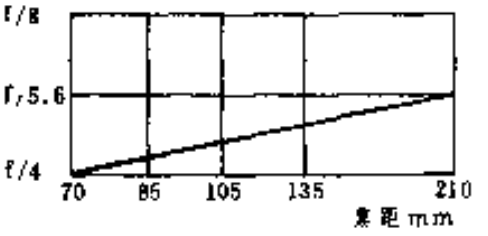


图3—11　尼柯AF70～210mm变焦距摄影镜头的光圈漂移曲线

表3—9

1 (1.12) (1.26)	**1.4** (1.6) (1.8)	**2** (2.2) (2.5)	**2.8** (3.2) (3.5)
4 (4.5) (5)	**5.6** (6.3) (7)	**8** (9) (10)	**11** (12.7) (14)
16 (18) (20)	**22** (25) (28)	**32** (36) (40)	**45** (50) (57)

某些摄影镜头由于设计上的原因，其最大光圈数值不是F制光圈数系列中所标示的数值，故该最大光圈数挡与邻挡光圈数间的曝光量差值必不等于一级。例如，海鸥4A型120照相机摄影镜头的光圈调节环上，标示的光圈数系列为：3.5、4、5.6、8、11、16、22，显然F3.5并非F制系列中的数值，由表3—9可知，F3.5与F4之间的曝光量仅相差1/3级。

将F制光圈数系列精细等分后，所获得之各挡光圈数之间，相差的曝光量级数与倍数，可由表3—10中查知。

由表3—10中可知，F1与F22之间的曝光量相差9级，F1的曝光量是F22的512倍。同理可知，F1.8与F2、F3.5与F4的曝光量相差1/3级，前者的曝光量是后者的1.26倍，F4.5与F5.6、F6.3与F8之间的曝光量相差2/3级，前者的曝光量是后

表 3—10 **各挡 F 数之间相差**

F数	1	1.12	1.26	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.5	2.8	3.2	3.5	4	4.5
各挡光圈系数间相差的曝光量级数（黑体数字）及相差的曝光量倍数（宋体数字）	9 512	8 2/3 406	8 1/3 323	8 256	7 2/3 203	7 1/3 161	7 128	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25
	8 2/3 406	8 1/3 323	8 256	7 2/3 203	7 1/3 161	7 128	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20
	8 1/3 323	8 256	7 2/3 203	7 1/3 161	7 128	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16
	8 256	7 2/3 203	7 1/3 161	7 128	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7
	7 2/3 203	7 1/3 161	7 128	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10
	7 1/3 161	7 128	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8
	7 128	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3
	6 2/3 102	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5
	6 1/3 81	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4
	6 64	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2
	5 2/3 51	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5
	5 1/3 40	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2
	5 32	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59
	4 2/3 25	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26
	4 1/3 20	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1
	4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1	
	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1		
	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1			
	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1				
	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1					
	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1						
	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1							
	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1								
	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1									
	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1										
	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1											
	1/3 1.26	0 1												

的曝光量级数与倍数速查表

5	5.6	6.3	7	8	9	10	11	12.7	14	16	18	20	22
4 1/3 20	4 16	3 2/3 10	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1
4 16	3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1	
3 2/3 12.7	3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1		
3 1/3 10	3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1			
3 8	2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1				
2 2/3 6.3	2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1					
2 1/3 5	2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1						
2 4	1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1							
1 2/3 3.2	1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1								
1 1/3 2.5	1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1									
1 2	2/3 1.59	1/3 1.26	0 1										
2/3 1.59	1/3 1.26	0 1											
1/3 1.26	0 1												
0 1													

查表方法：欲获知任意两挡光圈数（如 F3.5 与 F5.6）之间相差的曝光量级数或倍数，先从表中上面第一排 F 数中找出数值较大的那一挡 F 数（如 F5.6），并找该竖行最下一格数字（表中的$^{0}_{1}$那格），再沿该格所在横行向左找出另一光圈数（如 F3.5）所在竖行的交点，则交点处方格内的数字，就是两光圈数间相差的曝光量级数与倍数（即 F3.5 的曝光量比 F5.6 大 $1\frac{1}{3}$级，前者的曝光量是后者的 2.5 倍）。

者的 1.59 倍……。余类推。

过去在欧洲大陆曾流行过“大陆制”光圈数系列：1.6、2.2、3.2、4.5、6.3、9、12.5、18、25、36、50、72。

四、T 数（T 值）

摄影镜头的型号不同时，其光学结构往往不同，即不同型号摄影镜头内的透镜片数多少，及各透镜的形状、厚度、材料等一般不同。不同摄影镜头所存在的上述差异，再加上各透镜片上所镀增透膜的材料、层数等的不同，就使得不同型号摄影镜头对光线的透光率往往差异较大。

当把不同型号摄影镜头调至同一挡光圈数时，由于各镜头存在着透光率的差异，因而将导致感光胶片上所受到之曝光量的明显不同。

由于电影摄影中对曝光控制的要求尤为严格，故在有些新型电影摄影镜头上，除了标示有 F 制光圈数外，还同时标示有 **T 值光圈数**，又称 **T 数**（T 即透视比 Transmittance）。为了醒目地加以区别，F 数一般用白色数字标示，而 T 数用红色数字标示。T 值光圈数的系列与 F 制光圈数的系列，在数字上彼此相对应，但 T 值光圈数考虑了光线通过摄影镜头时，该镜头透光率 τ 对像平面处照度的影响。

$$\text{T 数} = \frac{\text{F 数}}{\sqrt{\tau}} \qquad (3\text{—}10)$$

例如，当某摄影镜头的透光率为 $\tau = 80\%$ 时，求光圈数 F2 相当于 T 值光圈多少？

解：

$$\text{T 数} = \frac{\text{F 数}}{\sqrt{\tau}}$$

$$= \frac{2}{\sqrt{80\%}}$$

$$= T\ 2.236$$

总之，T值光圈数比F制光圈数更科学，更便于对摄影进行精确的曝光控制，尤其对透镜片数较多的变焦距摄影镜头更为有利，故T值光圈数被普遍应用在新型电影摄影镜头上。

电影摄影者进行感光胶片实用感光度测定时，若采用T数进行测定，则将使所测定的精度更高。

但因目前普遍采用了多层镀膜技术，从而使摄影镜头在同一光孔状态下的T数与F数间的差异明显缩小，又因T数对控制景深大小不如F数更简明方便（参见《摄影镜头的使用技巧》一书第二章第一节），故在对曝光精度要求略低的照相摄影领域，T值光圈数未能获得推广应用。目前仅在美能达牌STF柔化衬景摄影镜头等少数照相用特殊摄影镜头上，采用了T值光圈（参见第四章十七中有关内容）。

第三节 调 焦 范 围

调焦范围也是摄影镜头技术性能的一项指标。

一、调焦与调焦距离

在被调焦物平面（即被摄主体平面）与照相机或电影摄影机的机身位置（即机位）分别确定以后，沿光轴方向调节摄影镜头焦平面相对该镜头实际成像平面（即感光胶片乳剂平面）之间的距离大小，使摄影镜头成像时之物距、像距、焦距三者之间的关系，符合高斯公式（2—2c）的调节过程，亦即令像距与物距二者之间彼此共轭的调节过程称为**调焦**。显然，拍摄时沿光轴方向单独前后移动摄影镜头同时改变物距与像距，或单独前后移动曝光窗改变像距，或单独微量改变摄影镜头的焦距使其焦平面的前

后位置改变，均将导致该摄影镜头焦平面与实际成像平面之间相对距离的改变，从而实现调焦。

当针对被摄主体平面精确调焦后，该被摄主体平面可在胶片乳剂平面上，结成最清晰的影像。亦即摄影时对谁调焦，谁的影像最清晰。故此又可称，令被调焦物平面处的景物在胶片平面上获得最清晰影像的调节过程，称为**调焦**。

摄影界也有少数人称调焦为对焦、对焦点、对距离、聚焦等。

当调焦准确从而能在感光材料平面上获得被摄主体的清晰影像时，摄影技术界习惯称其为**合焦**，摄影艺术界则习惯称其为**焦点实**、焦点清晰。而当调焦有误差，以至不能在感光材料平面上获得被摄主体的清晰影像时，摄影技术界习惯称其为**离焦**，摄影艺术界则习惯称其为**焦点虚**、焦点不实。①

调焦时手操作的零件称为调焦环或调焦钮。

在摄影镜头的调焦环上或照相机的调焦钮上，刻有调焦距离标尺。例如，国产海鸥 DF 型 135 照相机的标准摄影镜头（焦距为 58 毫米），就在调焦环上刻有下列调焦距离标尺：

m 0.6，0.7，0.8，0.9，1，1.1，1.2，1.5，2，3，5，10，∞

此标尺左边的字母 m，表示该标尺刻度以米为单位，∞ 为无限远。

国外有些厂家生产的摄影镜头，往往还同时标示有以英尺为单位的调焦距离标尺，并用英文 ft 或 Feet 标示在该数字系列旁边。为了加以区别，英制与米制数字系列的颜色往往不同。

---

① 此处的“焦点”并非指摄影镜头光学系统的焦点 F、F′，而是指被摄物点所发出之一束成像光线，经摄影镜头会聚于像平面上时，所聚“焦”而成之像“点”的俗称。其中“焦点的实与虚”分别指所成像点的锐利与弥散（即模糊）。

上述调焦距离标尺中的各数值，并非指摄影时的物距 l（物距的定义如下，自摄影镜头物方主平面至景物中被摄主体平面之间的距离），而是指自摄影镜头成像平面（即胶片乳剂平面）处，至被摄主体平面之间的距离。它是专为摄影调焦而刻划在摄影镜头上的，故一般称为**调焦距离**，又称**摄影距离**。图 2—4 中的 S 即调焦距离。

调焦距离等于物距（l）、像距（l'）、两主点间距（a）这三者之和，显然，它并不等于物距，且一般比物距大。

$$S = -l + a + l'$$

$$= \frac{f'(1-m)^2}{m} + a \qquad (3—11a)$$

由于摄影时所成影像为倒立影像，影像放大率 m 为负值，故此对上述公式求绝对值时可得下列形式的公式

$$S = \frac{f'(1+m)^2}{m} + a$$

$$\approx \frac{f'(1+m)^2}{m}$$

$$\approx \frac{l'(1+m)}{m}$$

$$\approx l(1+m) \qquad (3—11b)$$

在摄影镜头的镜筒上，都有一调焦基线。知道被摄主体至胶片乳剂平面间的实际距离数值后，调节摄影镜头的调焦环，使调焦距离标尺中相应的数值刻线，与调焦基线相对准，就能把被摄主体清晰地拍摄到胶片上。

为便于摄影者精确测量拍摄时的具体调焦距离数值，在电影摄影机或照相机的机身上，一般刻印有符号⊖，其中的直线段表示过该直线且与光轴垂直的平面，为机身内感光胶片乳剂平面的具体精确位置。

在电影摄影机机身上，一般还设置有一个挂钩，当把皮带尺

端部的挂环挂在该挂钩上时，该皮带尺上的0刻线将刚好与机身内之胶片乳剂平面精确重合，以便于摄影助理一人即可独立进行调焦距离的精确测量。

也有些普及型135照相机上所配备的短焦距摄影镜头，其调焦环上没有调焦距离标尺，而印有“人头像、半身人像、全身人像、远山”四挡调焦图案，它们所对应的调焦距离一般依次为1米、1.5米、3米、∞。摄影者在拍摄横画幅画面时，若欲拍摄半身人像，则只需将调焦环调至半身人像图案挡与调焦基线对正，并前后移动拍摄位置，使该人的半身影像沿高度刚好充满取景器内的画幅框即可；余类推。显然，依靠图案调焦比目测距离调焦更便于初学者掌握，当然调焦精度仍较低。

还有少数普及型135照相机的摄影镜头属于预调焦型（日文称为“固定焦点式”），镜头上没有调焦环。这类摄影镜头的焦距较短（一般为35毫米左右），光圈较小（一般为f/8左右），并在出厂前预先将摄影镜头调焦至某一距离处固定死（一般为2.5米左右）。显然，用这类照相机摄影时，获得最清晰影像的机率是较低的。

在设计35mm电影摄影机、135照相机的摄影镜头时，一般以所摄影像放大率 m 刚好为1:50时的像差校正得最佳，此系由于摄影中50倍的影像放大率是摄影者最常使用的场合之故。此时物距为51倍焦距值（即 $l_f = 51$），而所对应的调焦距离值约为52倍焦距值。

照相机、电影摄影机的调焦精度受摄影镜头调焦距离标尺刻制精度（镜头∞挡的刻制精度即为该镜头像面定位距精度）与机身像面定位距精度共同影响，而取景调焦验证精度尚受取景器精度的影响。

二、调焦范围与红外线摄影的调焦

摄影者希望摄影镜头的调焦范围愈大愈好，即希望所用摄影镜头具有较短的最近调焦距离值，以便能够在更近处拍摄，并获得较大的影像放大率和较强的透视效果。因此，摄影镜头的最近调焦距离 Smin 值也是一个比较重要的技术性能指标。

为不使摄影镜头的体积过大及成像质量明显下降，普通摄影镜头的最近调焦距离一般为该镜头焦距值的 10 倍左右，变焦距摄影镜头一般为其长焦距端之焦距值的 10 倍左右。

有的超摄远摄影镜头为了提高自动调焦（AF）的性能与速度，采用分段自动调焦的方式进行。例如佳能 EF 1200mm F5.6L USM 摄影镜头，把最近调焦距离至无限远分成三段：14 ~ 30m、30m ~ ∞、14m ~ ∞，并可通过转换开关随意控制。

在摄影镜头调焦基线旁边，一般还刻有一小红刻线或红点，并注以红色字母 R，此红刻线或红点为红外线摄影时的调焦基线。推拉式变焦距摄影镜头的红外线调焦基线一般为一红色曲线。参见图 3—10 中 13 所示。

普通调焦基线与红外线摄影调焦基线彼此不重合的原因是：红外线的波长远远大于可见光线的波长，以至红外线通过同一光学透镜时的折射角减小，像距增长之故。

使用红外线胶片摄影时，应象普通摄影那样，先用皮尺（或通过照相机的测距器）测量出被摄主体至感光胶片平面（机身上所刻印之符号⊖中的直线段，即表示感光胶片平面的精确位置）间的距离，再转动调焦环（或钮），使所测出之调焦距离刻度值，与该红外线调焦基线对正即可。

使用单镜头反光照相机进行红外线摄影时，可先转动调焦环

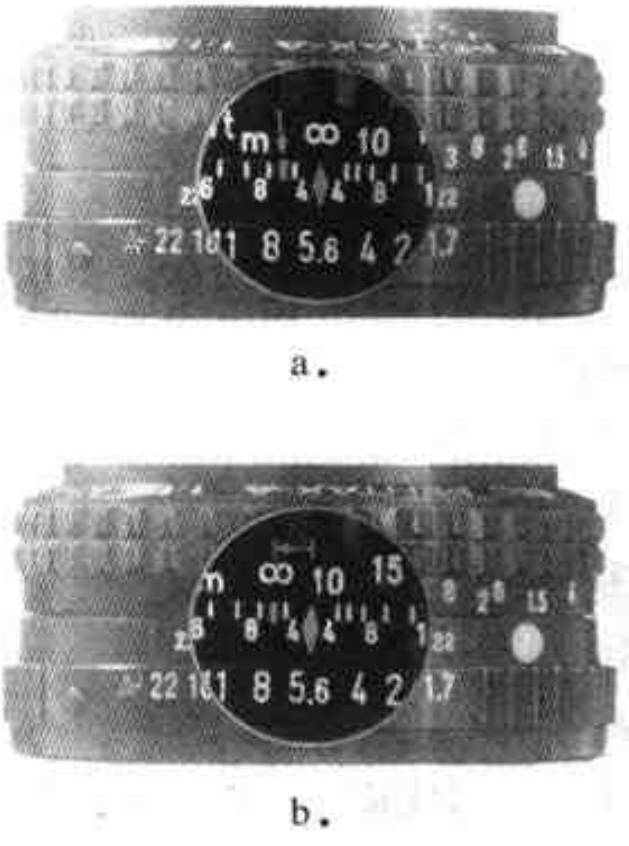


图 3—12 定焦距镜头的红外线摄影调焦

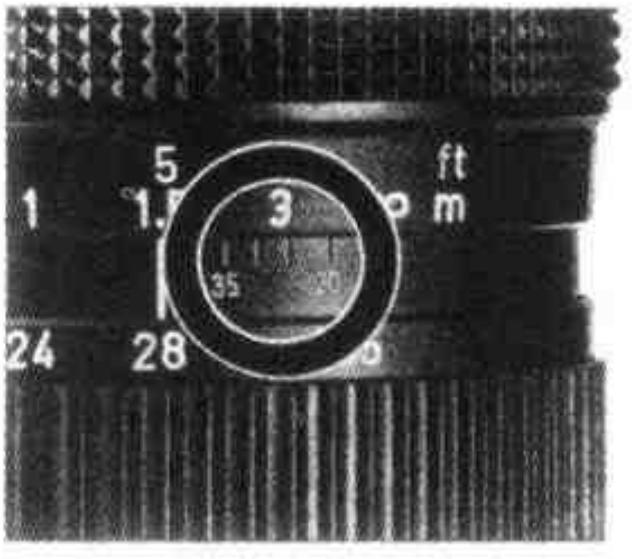


图 3—13 旋转式变焦距镜头的红外线摄影调焦

并通过取景器内的调焦屏对被摄景物准确调焦，然后将此刻摄影镜头普通调焦基线所指示的调焦距离值，转至与红外线调焦基线相对正（参见图 3—12 所示）。旋转式变焦距摄影镜头在调至不同焦距处时，其红外线调焦基线的位置一般不等（参见图 3—13 所示）。

某些采用低色散光学玻璃的镜头无单独的红外线调焦基线。

三、调焦方式与焦深

当被摄主体平面与机身位置分别确定后，使物距 l、像距 l'、焦距 f' 三者关系符合高斯公式的调焦方式，主要有下列三类：

1. 曝光窗调焦：

转动调焦钮调焦时，曝光窗沿光轴方向作水平前后位移，而摄影镜头静止不动。显然，曝光窗调焦的原理是在镜头焦距 f' 与物距 l 均不变的前提下，通过改变像距 l'，使焦距 f'、l 物距及像距 l' 三者符合高斯公式。

曝光窗调焦主要应用在一些大型专业照相机与某些转机上。

近年问世的德国康太克斯（CONTAX）AX 型 35mm 单镜头反光照相机，为求能够实现自动调焦 AF，同时又保持德国卡尔·蔡斯公司所产摄影镜头的高品质，也采用了曝光窗调焦方式。当然，作为单镜头反光 AF 照相机，为了实现曝光窗调焦方式，必须在调焦时，使曝光窗、感光胶片、后压片板与反光镜、五棱镜取景器等，同步前后伸缩移动。显然，这必将导致驱动机构复杂，所需要的驱动力矩及消耗的电能较大，同时此机构的耐震性也将相对较弱。为此厂家采用了日本京磁公司生产的极耐磨的高精度陶瓷作前后移动导孔，并采用了超声波马达进行瞬间无噪声驱动。

2. 整组调焦：

转动摄影镜头调焦环或机身上的调焦钮调焦时，光学系统的全部透镜组元作为一个整体，沿光轴方向同步前后伸缩位移，而摄影镜头的焦距值始终保持不变。显然，整组调焦的原理是在焦距 f' 不变的前提下，同时改变物距 l 与像距 l'，以使焦距 f'、物距 l 与像距 l' 三者的具体数值符合高斯公式。此调焦方式对摄影镜头像差的影响较小，但调焦机构的结构复杂，体积与重量较大。

整组调焦一般采用多头螺纹伸缩机构控制全部光学系统的前后位移。调焦时整个光学系统将作长距离的前后伸缩。参见图 3—14 中所示。

整组调焦又按位移的方式不同，而分为平移式与转移式两种：

平移式调焦指调焦时光学系统全部透镜组元只作前后水平伸缩位移而不转动。此方式可在调焦过程中，使安装在摄影镜头前端之滤光镜的方位恒保持不变，且可以使用遮光效果较理想的矩形或方形遮光罩，目前应用最为广泛。

转移式调焦指调焦时光学系统全部透镜组元边绕光轴旋转、边前后伸缩位移。显然在调焦过程中，安装在摄影镜头前端的滤光镜将产生附加旋转运动，从而将导致滤光镜方位的改变，且只能使用遮光效果较差的圆形遮光罩。这将对使用偏振镜摄影时带来诸多不便。此种调焦方式常见于某些早期的摄影镜头上，如早期的莱卡照相机、上海 58-Ⅱ型照相机等。

3. 部分组元调焦：

转动摄影镜头调焦环或调焦钮调焦时，摄影镜头中仅部分光学透镜组元沿光轴方向作微量前后伸缩位移，而其它透镜组元静止不动。显然，这种调焦方式在调焦时，摄影镜头的焦距值将产生一定的微量变化。此调焦方式是模拟人眼睛观看远近不同物体时的调焦原理而开发的。

部分组元调焦的原理如下：当光学系统中的部分透镜组元沿光轴方向改变其前后位置时，根据公式（2—9）可知，由于前后透镜彼此间距 Δ 的改变，将使摄影镜头的焦距值产生变化，并使摄影镜头主平面的前后位置产生相应变化。因此部分组元调焦是同时改变摄影镜头焦距 f'、物距 l 与像距 l' 三者的大小，以使三者的具体数值符合高斯公式的过程。

部分组元调焦方式目前主要是应用在变焦距摄影镜头及长焦距摄影镜头上。因为这类摄影镜头的体积较大、重量较重，不宜采用整组调焦方式。面现代自动调焦（*AF*）摄影镜头为了减轻驱动透镜调焦的动力，一般也多采用部分组元调焦方式。此外早期的某些定焦距摄影镜头为简化机构，也曾采用部分组元调焦方式。

部分组元调焦的优点如下：由于调焦时通过部分透镜组元短距离的轴向前后伸缩位移，取代了整组调焦中整个光学系统长距离的前后伸缩，同时调焦机构的结构较简单，因而使得摄影镜头的体积与重量均较小。

但部分组元调焦方式存在下述缺点：调焦时部分透镜组元的单独前后位移，易导致摄影镜头像差校正的不够理想，从而影响该摄影镜头的成像质量，故此光学设计难度较大。

部分组元调焦方式主要有前组调焦与内组调焦、后组调焦三种类型：

前组调焦：此方式指摄影镜头最前方的透镜组为调焦组的那类摄影镜头。这类调焦方式常见于某些早期的照相机上。当摄影者旋转摄影镜头调焦环时，调焦环将驱动前组透镜，边旋转边前后伸缩着进行调焦。

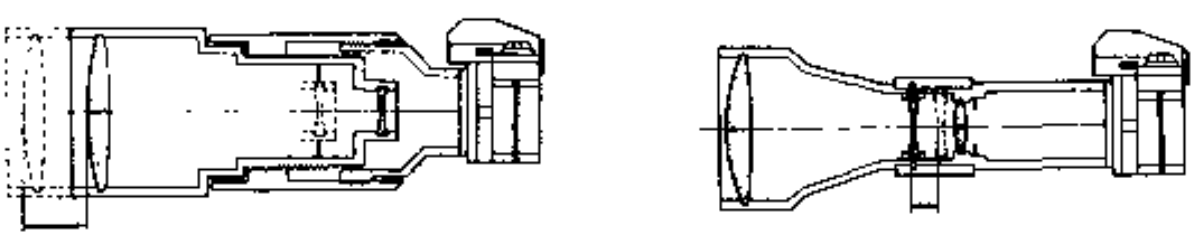
采用前组调焦方式的摄影镜头，一般通过单头螺纹机构控制前透镜组的前后伸缩运动，结构简单，成本低廉。只是由于前组调焦时，前组透镜及镜头圈跟着进行旋转，故此将对镜头前方安装偏振镜摄影时带来诸多不便，且成像质量相对略低，目前已较少被采用了。

例如，早期的海鸥 203 型 120 照相机即采用了前组调焦的结构。该照相机的摄影镜头为三组三片式的光学结构（第一、三片为凸透镜，第二片为凹透镜），其第一片凸透镜为调焦组。

内组调焦 IF（Internal Focusing System）与**后组调焦**（Rear Focusing System），分别简称内调焦与后调焦，此方式指通过调节光学系统内部或后部部分透镜组元的前后位置，实现调焦的调节机构（参见图 3－15 中所示）。现代变焦距摄影镜头与长焦距摄影镜头以及自动调焦（AF）摄影镜头，大多采用内组或后组调焦方式。

在采用内调焦或后调焦的摄影镜头上，一般用凸轮机构取代

了大而笨的多头螺纹伸缩机构，由部分光学透镜组元沿轴向作较短距离的前后位移，因而使调焦时摄影镜头的总长度不会象整组调焦那样显著伸缩，也不会失去重量平衡（参见图 3—14 中所示），并使摄影镜头体积小巧，且只需使调焦环略转动一小角度，就可完成较大距离范围内的调焦操作，调焦迅速。这既明显提高了摄影镜头的操作性能，又使调焦机构的重量明显下降，并使摄影镜头的最大相对孔径较大。



a.整组调焦　　b.内调焦

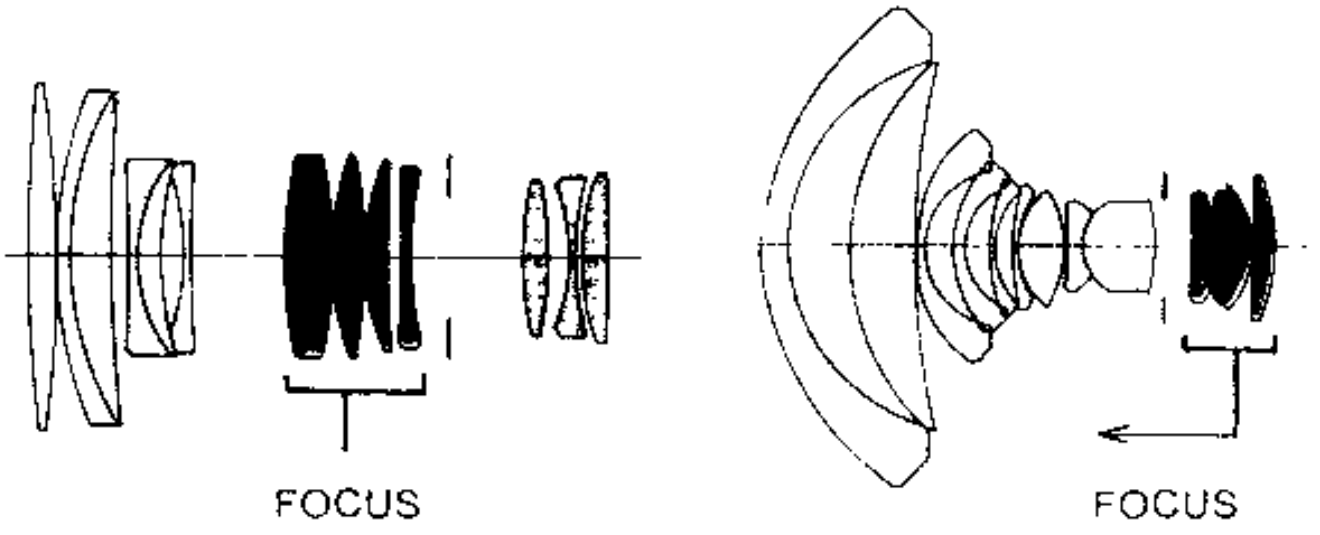
图 3—14　内调焦与整组调焦的区别

例如，尼柯 300 毫米 F2.8、400 毫米 F3.5、600 毫米 F4、1200 毫米 F11、腾龙 300 毫米 F2.8LD 等摄影镜头，均采用了内调焦结构。

佳能 EF100mm F2.8 Macro USM 微距摄影镜头为 8 组 12 片式的光学结构，可实现自无限远至 0.31 米的微距摄影，其微距摄影时的影像放大率最大可达 1:1。此款摄影镜头即采用内组调焦方式工作——调焦时三群光学透镜各自按其不同的运动曲线进行相应的联动调节，参见图 5—6 中所示。

佳能 EF 28-70mm F2.8L USM 变焦距摄影镜头为 10 组 16 片式的光学结构。此款变焦距摄影镜头也采用了内组调焦方式，其第 2 组透镜为调焦组，当对无限远调焦时，第 1、2 组透镜间的间距最大，当向最近距离调焦时，第 2 组向前移动而逐渐向第 1 组靠拢。参见图 5—24 中所示。

但因内调焦一般系通过凸轮机构控制调焦，故较易磨损而影



a.内调焦　　b.后调焦

图 3—15　内调焦与后调焦

响调焦精度，此外摄影镜头像差的校正也较难。

内调焦的另一缺点是近摄时焦距略短，摄影倍率也较小。有的摄影镜头的这一缺点非常明显，例如某款 28～80mm 的变焦距摄影镜头在变焦至 80mm 焦距处后，对无限远调焦时其实际焦距值尚为 80mm，而一旦改为对较近距离处调焦时（如拍人物特写画面），则其实际焦距值明显小于 80mm（摄影者可由其所摄画面效果与 80mm 定焦距传统镜头所摄画面效果的对比中明显的看出这一缺陷来）。摄影者在选购摄影镜头时，应注意避免购买焦距值下降较大、较显著的摄影镜头。

某些长焦距摄影镜头的调焦环，在调焦至∞时仍可继续转动调焦环，以至于超过∞刻线。这种设计的目的是为了在极热时补偿摄影镜头因透镜片等热膨胀而引起的调焦误差。例如，尼柯 400 毫米 1∶3.5 IF-ED 型摄影镜头。使用这类摄影镜头拍摄时，只需通过单镜头反光照相机的取景器，将被摄主体的取景影像调至最清晰时即可。

在被摄主体平面与镜头机身的位置分别确定以后，为保持被摄主体成像清晰，所允许的感光胶片纵深位置的离焦误差量，称

为焦深。

理想像平面前、后方的可允许离焦误差深度，分别称为前焦深与后焦深。前焦深与后焦深的数值相等。

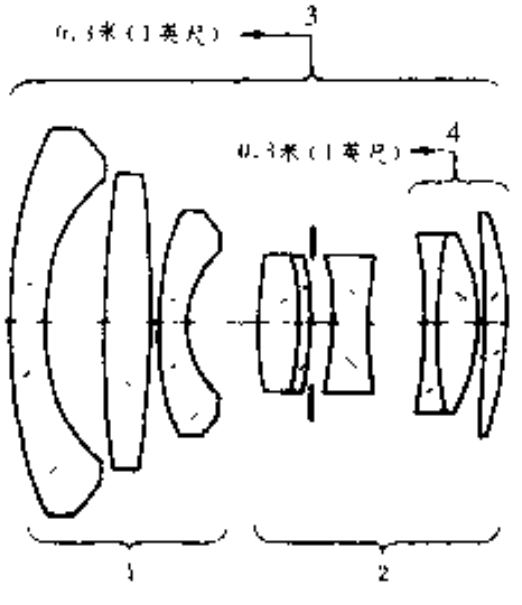
照相机与电影摄影机一般以二分之一焦深值，甚至更小的数值，作为其曝光窗处感光胶片平面位置精度的公差标准——即可允许的最大误差极限。

四、调焦补偿组元

当某些整组调焦式定焦距摄影镜头进行调焦时，伴随着全部光学系统的同步前后伸缩，其中部分透镜组元还进行微量的附加位移，且随着具体调焦距离的远近不同，这部分透镜组元在摄影光路中的附加位移量也不相同，即其相对整个光学系统的具体位置也在相应改变，这部分在调焦时产生附加位移的透镜组元，称为**调焦补偿组元**。又称调焦补偿群或浮动组元（Floating）、游动组元。

调焦补偿光学组元可在近距离拍摄时，明显降低摄影镜头的像散、场曲、球差等像差，显著提高摄影镜头近距离摄影时的影像清晰度，改善成像质量。

调焦补偿组元的设计最早由尼康公司的尼柯 24 毫米、F 2.8 广角摄影镜头所采用。见图 3－16 中所示。图中 1 为位于前方起发散作用的负组透镜系统，2 为位于后方起会聚作用的正组透镜系统，3 为自无限远至最近距离处（0.3 米即 1 英尺）调焦时整个光学系统的运动方向，4 为向最近距离处（0.3 米）调焦时调焦补偿组元的附加运动方向。



1. 发散透镜系统　2. 会聚透镜系统

图 3—16　尼柯 24 毫米反摄远型镜头

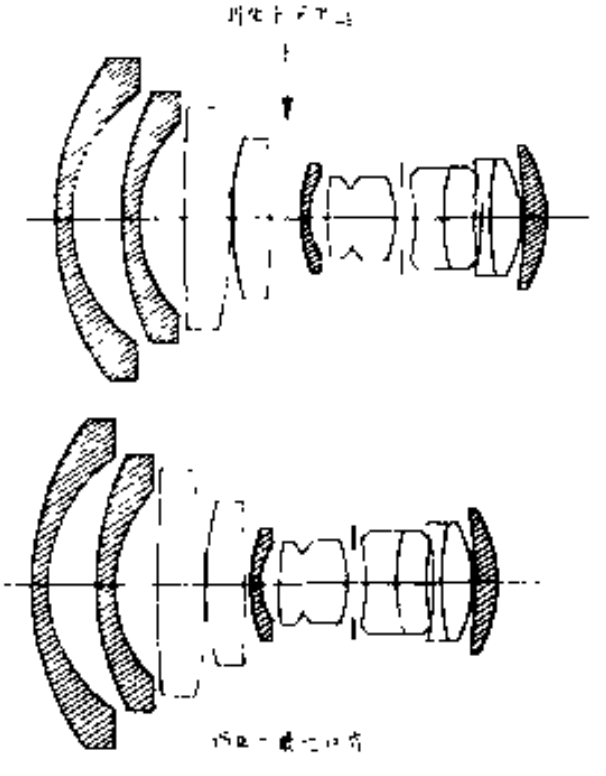


图 3—17　佳能镜头的调焦光学组元

由于调焦补偿组元的设计思路先进，于是各光学厂家竟相应用于自己的光学设计中。佳能 FD17mm、F4 广角镜头即采用了调焦补偿组元的设计，见图 3－17 中所示。近来在一些相对孔径较大的标准摄影镜头，甚至略长焦距的镜头上也有所采用。例如佳能 EF85 mm F1.2L USM 镜头等。

在 35 毫米照相机的摄影镜头中，上述调焦补偿组元的位移也由调焦环控制，即该调焦补偿组元与调焦环联动——当调焦环控制摄影镜头全部光学系统前后位移的同时，还通过传动机构带动该调焦补偿组元产生相应的附加位移。

某些内部设有调焦补偿组元的摄影镜头，由于调焦机构未能与调焦补偿组元的传动机构联动，故此当摄影者转动摄影镜头调焦钮进行调焦时，应视具体调焦距离的远近不同，按设计要求相应改变该调焦补偿组元在摄影光路中的具体位置，以求获得该摄影镜头的最佳成像质量。

日本玛米亚（MAMIYA）RB67 型 120 照相机所配套的焦距 50 毫米与 65 毫米广角镜头上，也采用了调焦补偿组元。与其它摄影镜头不同的是，由于 RB67 由机身上的调焦钮通过伸缩皮腔间接控制摄影镜头调焦，故此调补偿组元需单独操作（即无法与调焦钮联动），操作方法如下：摄影者边旋转机身上的调焦钮边观看取景器精确调焦后，立即根据机身上调焦基线所指示出的具体调焦距离值，转动广角摄影镜头上的调焦补偿环（此环可控制摄影镜头中的调焦补偿组元产生相应附加位移，此环的外观好似调焦环并可读取景深值），使该环上相同的那一距离刻度与基线对正，以更好地校正该镜头的像差。但调焦时若仅操作调焦环调焦，则该镜头无法获得其最佳成像效果。

五、整组调焦时镜筒伸出量的计算

当对无限远景物调焦时，物距 l 为 ∞，像距 l' 刚好等于焦距 f'，此时整个光学系统向后缩至终点位置。

当对有限远景物调焦时，随着物距 l 的逐渐缩小，像距 l' 逐渐增大，整个光学系统逐渐向前伸出，此时的像距 l' 为

$$l' = f' + x'$$

显然，在对有限远景物调焦后所获得的焦像距值 x'，就是整组调焦时镜筒自无限远位置向前伸出后的伸出量大小。

由公式（2－5a）知

$$l' = f'(1 - m)$$

$$= \frac{lf'}{l - f}$$

∴当摄影镜头位于空气介质之中时

$$x' = l' - f'$$

$$= -f'm$$

$$= \frac{f f'}{l - f} \tag{3—12a}$$

用绝对值表示时的焦像距值 x' 为

$$x' = f m$$

$$= \frac{f^2}{l - f}$$

$$= \frac{f}{l_j - 1} \tag{3—12b}$$

例 1　已知某摄影镜头焦距为 18 毫米，求自无限远位置分别调焦至物距为 20、15、10、5、2、1、0.5、0.4、0.3 米时，镜筒的伸出量 x'。

解：由公式（3—12b）可知

$l = 20$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{20000 - 18} = 0.0162$ 毫米

$l = 15$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{15000 - 18} = 0.0216$ 毫米

$l = 10$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{10000 - 18} = 0.0325$ 毫米

$l = 5$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{5000 - 18} = 0.065$ 毫米

$l = 2$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{2000 - 18} = 0.1635$ 毫米

$l = 1$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{1000 - 18} = 0.33$ 毫米

$l = 0.5$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{500 - 18} = 0.672$ 毫米

$l = 0.3$ 米时　　$x' = \frac{18^2}{300 - 18} = 1.15$ 毫米

例 2　已知某摄影镜头焦距为 50 毫米，求自无限远位置分别调焦至物距为 20、15、10、5、2、1、0.5、0.3 米时，镜筒的伸出量 x'。

解：由公式（3—12b）可知

$l = 20$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{20000 - 50} = 0.125$ 毫米

$l = 15$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{15000 - 50} = 0.167$ 毫米

$l = 10$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{10000 - 50} = 0.251$ 毫米

$l = 5$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{5000 - 50} = 0.505$ 毫米

$l = 2$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{2000 - 50} = 1.28$ 毫米

$l = 1$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{1000 - 50} = 2.63$ 毫米

$l = 0.5$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{500 - 50} = 5.56$ 毫米

$l = 0.4$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{400 - 50} = 7.14$ 毫米

$l = 0.3$ 米时　　$x' = \frac{50^2}{300 - 50} = 10$ 毫米

例 3　已知某摄影镜头焦距为 100 毫米，求自无限远位置分别调焦至物距为 20、15、10、5、2、1、0.5、0.3 米时，镜筒的伸出量 x'。

解：由公式（3—12b）可知

$l = 20$ 米时　　$x' = \frac{100^2}{20000 - 100} = 0.503$ 毫米

$l = 15$ 米时　　$x' = \frac{100^2}{15000 - 100} = 0.67$ 毫米

$l = 10$ 米时　　$x' = \frac{100^2}{10000 - 100} = 1.01$ 毫米

$l = 5$ 米时　　$x' = \frac{100^2}{5000 - 100} = 2.04$ 毫米

$l = 2$ 米时　　$x' = \dfrac{100^2}{2000 - 100} = 5.26$ 毫米

$l = 1$ 米时　　$x' = \dfrac{100^2}{1000 - 100} = 11.1$ 毫米

$l = 0.5$ 米时　　$x' = \dfrac{100^2}{500 - 100} = 25$ 毫米

$l = 0.3$ 米时　　$x' = \dfrac{100^2}{300 - 100} = 50$ 毫米

分析上述计算结果，可总结出整组调焦时的下述规律：

1. 当自无限远挡调焦至同一有限物距挡时，摄影镜头的焦距愈短，镜筒伸出量也愈短；焦距愈长镜筒伸出量也愈长。因此，为了不至使摄影镜头的体积过大，镜头的焦距愈长，其最近调焦距离一般就相对愈远。也正因为超长焦距摄影镜头在整组调焦时镜筒伸出量很大，于是纷纷采用内调焦结构。

2. 调焦时镜筒伸出量的大小与物距的移近不成比例关系。例如使用焦距 50 毫米摄影镜头拍摄，当物距由 20 米移至 10 米处时，物距缩短了 10 米，镜筒伸出量仅增加了 0.126 毫米 (0.251 - 0.125 = 0.126)；而当物距由 1 米移至 0.5 米处时，物距仅缩短了 0.5 米，镜筒伸出量却增加了 2.93 毫米 (5.56 - 2.63 = 2.93)。因此，摄影镜头调焦环（钮）上之调焦距离标尺的各刻线，并不按调焦距离数值的大小等间隔排列——调焦距离愈远各刻线彼此排列得愈密集，调焦距离愈近各刻线彼此排列得愈稀疏。为此，在电影或电视摄影中，当针对某一与摄影机有相对匀速运动的物体连续调焦时（即进行“跟焦点”操作时），手转动调焦环（钮）的角速度，应随着物距的愈来愈近而逐渐加快；反之，随着物距的愈来愈远，手转动调焦环（钮）的角速度应逐渐减慢。摄影者在跟焦点摄影前，应反复练习上述调焦技法，做到调焦连续、过渡圆滑、位置准确。

公式（3—12b）系假定调焦时摄影镜头物方主点位置恒不变

(即物距不变)，若调焦时令照相机机身位置恒不变（即调焦距离不变)，则

$$x' = \frac{S - L_{FF'}}{2} - \sqrt{(\frac{S - L_{FF'}}{2})^2 - f^2} \qquad (3—12c)$$

上述公式（3－12c）可供摄影者在自己所用摄影镜头之调焦距离标尺的刻度模糊时，重新刻划该调焦距离标尺用。

第四节 像差与成像质量评价

摄影镜头的成像误差称为**像差**。

为了更好地研究像差，应熟悉下列几个概念：

由物点发出之成像光束的中心光线，或由物点发出的通过入射光瞳中心的光线，称为**主光线**（一般用 Z 标示)。

为了研究位于光轴外的物点向摄影镜头所发出之斜射光束的结构，一般自该光束中过主光线选取两个互相垂直的平面——子午面与弧矢面进行研究。因为此二截面内之光束的相交状况，一般可近似代表整个光束的成像状况。

轴外物点向摄影镜头发出的斜射光束存在一对称面，该对称面为主光线与光学系统光轴所构成的平面，称为该光束的**子午面**(Meridional Plane 或 Tangential Plane)。位于子午面内的那部分光线，统称为**子午光束**。子午光束所结成的影像，称为子午像点 M 或 T。子午像点所在的像平面，称为子午像面。

过轴外物点的主光线，并与子午面垂直的平面，称为该光束的**弧矢面**（Sagittal plane)。位于弧矢面内的那部分光线，统称为**弧矢光束**。弧矢光束所结成的影像，称为弧矢像点 S。弧矢像点所在的像平面，称为弧矢像面。

一、像差与像差曲线

任何摄影镜头都存在着程度不同的像差。这些残存像差将使该摄影镜头的成像质量受到程度不同的影响。

摄影者希望所用摄影镜头的残存像差愈小愈好。一只摄影镜头的成像质量优劣，即其对像差校正的优良与否，一般可通过其像差曲线的形状识别出来。

常见像差有下列6种：球差、彗差、像散、场曲、畸变、色差。

1. 球差

由光轴上某一物点向光学系统发出的单色圆锥形光束，经该光学系统折射后，若原光束不同孔径角的各光线，不能交于光轴上的同一位置，以至在光轴上的理想像平面处，形成一弥散光斑（俗称模糊圈），则此光学系统的成像误差称为**球差**。如图3－18中所示。

对单色光而言，光轴上物点的像差只有球差。

由轴上物点发出的单色成像光线中，设射向入射光瞳边缘之光线与光轴交点的像距为 L'，并设该物点发出之近轴光线与光轴之交点的像距为 l'，则 L' 与 l' 二者之差即为球差 $\delta L'$。

$$\delta L' = L' - l'$$

由于 $\delta L'$ 为沿轴向度量的，故此称为**轴向球差**。

D 光、F 光、C 光的各自球差分别为：

$$\delta L'_D = L'_D - l'_D$$

$$\delta L'_F = L'_F - l'_D$$

$$\delta L'_C = L'_C - l'_D$$

轴向球差曲线一般以所测光线的相对入射高度 h/h_M（或 $\sin U/\sin U_M$）为纵坐标，以球差 $\delta L'$ 为横坐标表示。

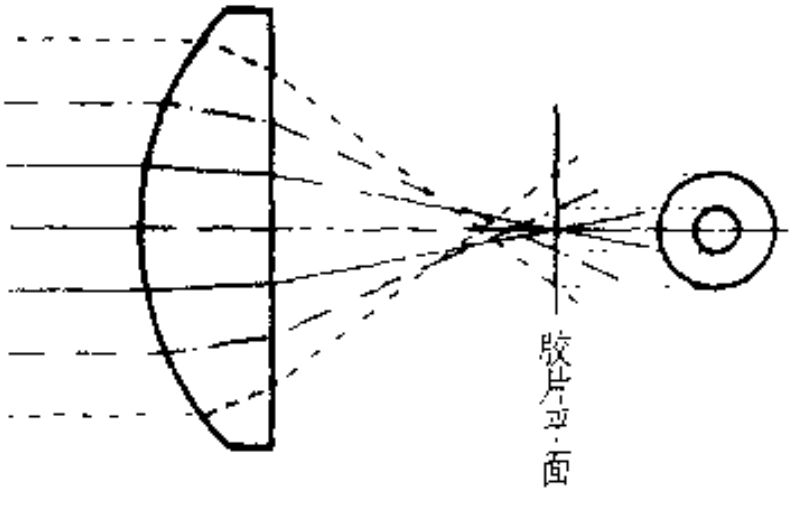


图 3—18 球差

相对入射高度 h/h_M 指所测光线的实际入射高度 h 与孔径边缘光线的最大入射高度 h_M 之比（U 为所测光线的实际入射孔径角，U_M 为光束的最大孔径角）。

球差曲线的球差值 $\delta L'$ 愈小愈好，即球差曲线愈向纵坐标轴靠拢愈好。

某光学系统对 D 光线的球差曲线参见图 3－19 中的 D 光曲线所示。由图中可知，$h/h_m = 1.0$ 处的 $\delta L' = 0$，这表示该光学系统对边缘光线校正了球差。

球差 $\delta L'$ 的计算公式如下：

$$\delta L' = A_1 h_1^2 + A_2 h_1^4 + A_3 h_1^6 + \cdots\cdots$$

公式中的第一项、第二项、第三项等，分别称为**初级球差**、二级球差、三级球差等，其中二级球差以上者统称为**高级球差**。

在设计摄影镜头时，除对孔径边缘光线即最大入射高度 h_M 校正球差外，即令边缘光的球差 $\delta L_M' = 0$ 外，一般还需对带孔径光线即相对入射高度为 $(1/\sqrt{2})\ h_M = 0.707 h_M$ 的带上，校正剩余球差。该 0.707 带光线的球差称为**带光球差** $\delta L_Z'$。

球差也可在高斯像平面上沿垂直于光轴的方向对物点所成弥散圆半径进行度量，而得**垂轴球差** $\Delta y'$。

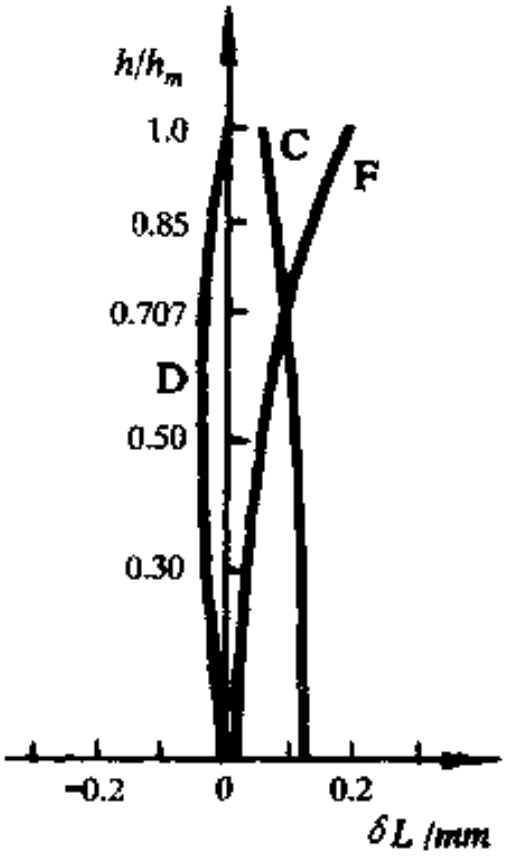


图 3—19　球差曲线

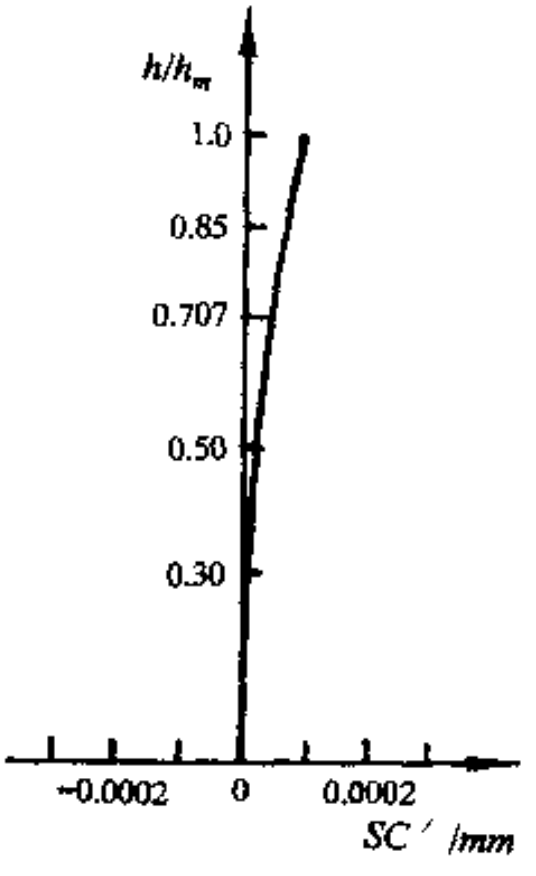


图 3－20　正弦差曲线

对轴外光线而言，存在轴外子午球差 $\delta L_T'$ 与轴外弧矢球差 $\delta L_S'$。

由于球差与孔径角有关，因此**拍摄时适当缩小光孔**（即把光圈数值调至较大），**可以相对减小球差对成像的不利影响**。

2. 彗差

由位于光轴外的某一轴外物点，向光学系统发出的单色斜射圆锥形宽光束，经该光学系统折射后，若在理想像平面处不能结成清晰的像点，而是结成拖着明亮尾巴的彗星形光斑，则此光学系统的成像误差称为**彗差**。如图 3—21 中所示。

由于光学系统存在彗差，使得原本以主光线为对称的斜射光束，经过光学系统后变得不再对称。

彗差又分子午彗差 K_T'、弧矢慧差 K_S' 两种。

轴外物点沿子午面所发出之子午光束中的上下两边缘光线经

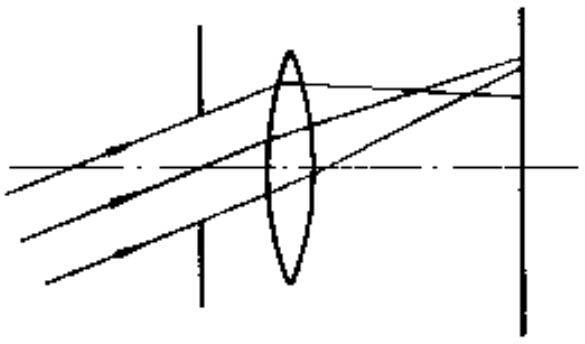


图 3—21　彗差

过光学系统后的交点，沿垂直于光轴方向上与主光线之间的偏离距离，称为子午彗差 K_T'；轴外物点沿弧矢面所发出的弧矢光束中的左右两边缘光线经过光学系统后的交点，沿垂直于光轴方向上与主光线之间的偏离距离，称为弧矢彗差 K_S'。

彗差曲线一般用所测光线的相对入射高度 h/h_M（或 $\sin U/\sin U_M$）为纵坐标，以子午彗差 K_T' 或弧矢彗差 K_S' 为横坐标表示。摄影者希望彗差愈小愈好，亦即希望子午彗差曲线与弧矢彗差曲线均愈靠拢纵坐标轴愈好。

拍摄时适当缩小光孔（即把光圈数值调至较大），**可以相对减小彗差对成像的不利影响。**

摄影界一般将球差与彗差所引起的成像模糊现象称为光晕。

由于相对孔径愈大，校正球差与彗差愈加困难，故使用大相对孔径的摄影镜头并将光圈全开时，光晕现象尤其明显。此外，被摄体的反差愈强，则同一镜头在相同光圈之下出现的光晕现象愈明显。因此，在拍摄逆光与夜景照片时，应预先了解所用摄影镜头在哪挡光圈下，消除光晕现象的效果较好。以免所摄照片光晕太大而既浪费胶片，又贻误良机。

对于共轴光学系统，光轴周围垂直于光轴的微小线段，其理想成像条件为正弦条件。

倘若某光学系统在实际成像时偏离了上述正弦条件，则其偏离的程度大小即其**正弦差** SC' 的大小，将直接影响着像平面上光

轴周围小范围内的成像质量。摄影者希望正弦差 SC' 愈小愈好。

当正弦差 $SC'=0$ 时，表示光轴的临近物点在成像时没有彗差存在。

有的光学公司提供其产品的正弦差 SC' 曲线。该曲线一般以相对入射高度 h/h_M 为纵坐标，以正弦差 SC' 为横坐标表示。

图 3—20 为某光学系统的正弦差 SC' 曲线。优良摄影镜头的正弦差 SC' 曲线非常接近纵坐标轴。

3. 像散与场曲

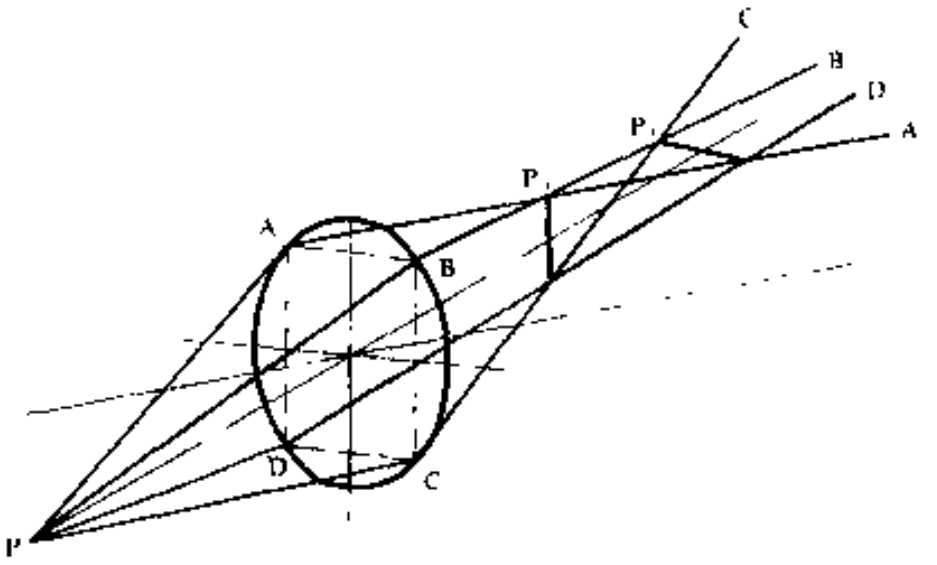
由位于光轴外的某一轴外物点，向光学系统发出的斜射单色圆锥形光束，经该光学系统折射后，未能结成一个清晰的像点，而结成一弥散光斑，当前后移动像平面至某一位置（子午像面）时，弥散光斑变成垂直于光学系统子午面的短线 T（此短线系由子午光束结成的像，称为该轴外物点的子午焦线），当像平面移至另一位置（弧矢像面）时，弥散光斑又变成垂直于光学系统弧矢面的短线 S（此短线系由弧矢光束结成的像，称为该轴外物点的弧矢焦线，显然弧矢焦线与子午焦线彼此空间垂直）。在子午像面与弧矢像面之间可找到一弥散光斑最小的成像平面，而在其余位置只能得到一个椭圆形弥散光斑，则此光学系统的成像误差称为像散。如图 3－22 中所示。

设主光线周围之子午细光束焦线与理想像平面之间的距离为 X_T'，弧矢细光束焦线与理想像平面之间的距离为 X_S'，则上述子午细光束焦线与弧矢细光束焦线之间的距离即为像散 X_{TS}'。

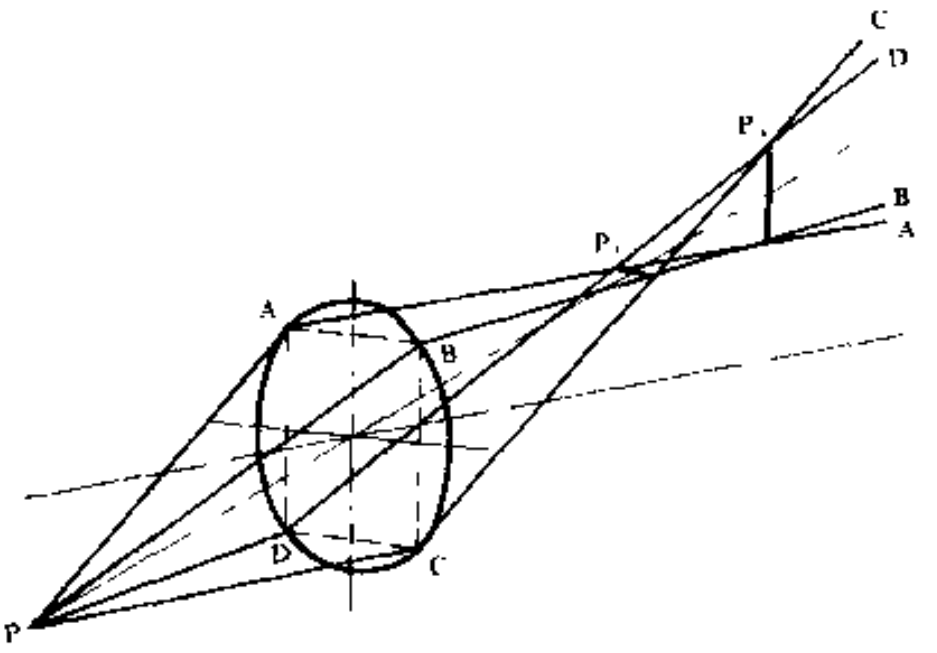
$$X_{TS}' = X_T' - X_S'$$

像散表示主光线周围之细光束的成像质量。摄影镜头的像散值愈小，则其成像质量愈好。

像散像差曲线一般以所测光线的相对入射高度 h/h_M（或 $\sin U/\sin U_M$）为纵坐标，以像散 X_{TS}' 为横坐标表示。



a.



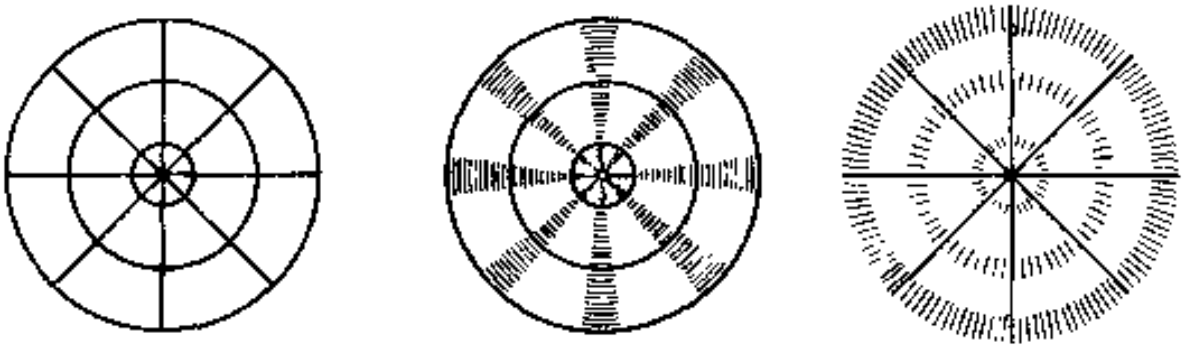
b.

图 3—22 像散

像散的大小随视场角的大小而有所差异，即被摄主体物平面上之各物点距离光轴的远近不同，其各自成像时的像散大小一般也将有所不同。

用残存有像散的光学系统，拍摄由若干同心圆和若干径向直线组成的平面图案，且光轴过圆心时（如图 3—23a 中所示），在

子午像面处只能获得各同心圆环清晰，各径向直线模糊的影像（如图 3—23b 中所示）；在弧矢像面处又只能获得各径向直线清晰，各同心圆环模糊的影像（如图 3—23c 中所示）。总之，不论将成像平面调至何处，均无法获得同心圆环与径向直线都同时非常清晰的影像。此时的最佳成像平面的位置，处于子午像面与弧矢像面之间的某处，面在该处所获得的影像也只能是折中结果——同心圆环与径向直线均相对较清晰的影像。



a. 物体　　b. T 象面　　c. S 象面

图 3—23　残存像散时的视场中央影像

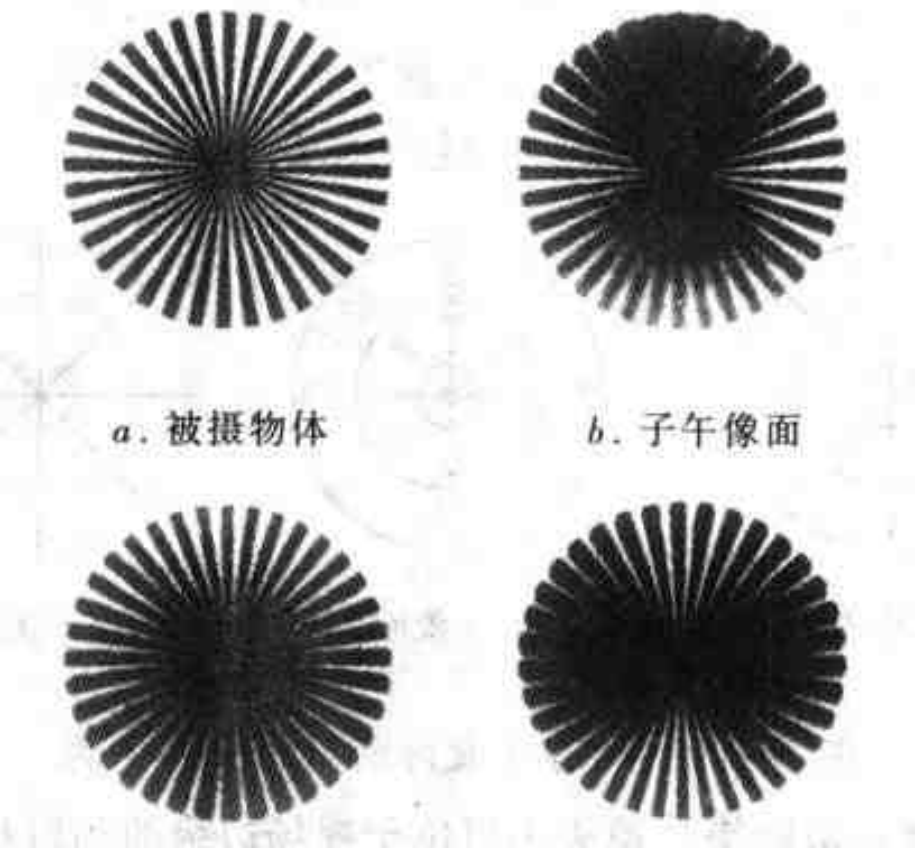
若用有像散的摄影镜头拍摄位于视场边缘的辐射状分辨率图案（如图 3－24a 中所示），则在子午像面（T）、弧矢像面（S）与最佳像面处的影像形状，分别如图 3－24 中 b、c、d 图所示。

摄影时，垂直子光轴的平面物体经光学系统所结成的清晰影像，若不在垂直于光轴的同一像平面内，而在一以光轴为对称的弯曲表面上，即该光学系统的最佳像面为一曲面，则此光学系统的成像误差称为**场曲**，又称像场弯曲、像面弯曲。参见图 3—25 中所示。

上述子午像点与理想像平面之间的距离 X_T'，弧矢像点与理想像平面之间的距离 X_S'，分别称为子午场曲 X_T' 与弧矢场曲 X_S'。二者统称为该光学系统的场曲像差。

当轴外物点的视场大小改变时，光学系统子午像点的位置与

弧矢像点的位置，也必将随视场角的变化而有所差异。由上述子午像点与弧矢像点各自所构成的子午像面与弧矢像面，将各自呈现为一与理想像面中心点相切的曲面，此两曲面分别为该光学系统的子午场曲像面与弧矢场曲像面。



a. 被摄物体　　*b*. 子午像面

d. 中间像面　　*b*. 弧矢像面

图 3—24　残存像散时的视场边缘影像

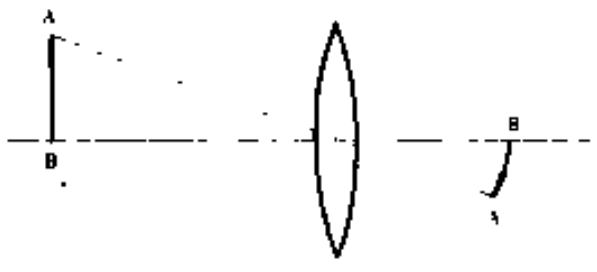


图 3－25 中　场曲

场曲像差曲线一般以物方相对视场角 ω/ω_M 为纵坐标，以子午场曲 X_T' 与弧矢场曲 X_S' 为横坐标表示，并同时绘制出子午场

曲与弧矢场曲两条曲线。参见图 3—26 中所示。子午场曲 X_T' 曲线与弧矢场曲 X_S' 曲线，愈靠拢纵坐标轴愈好。

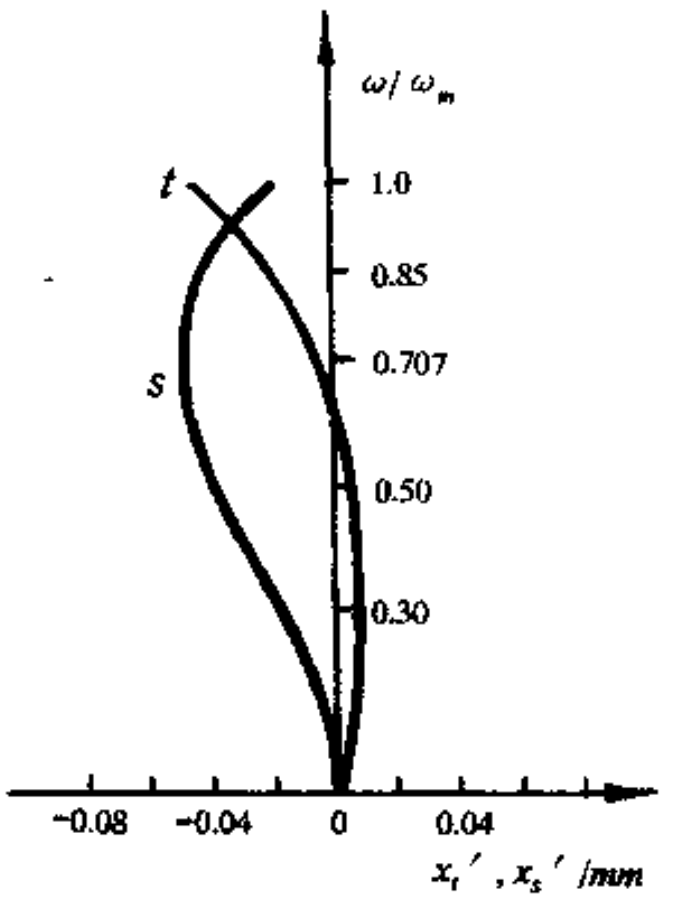


图 3—26　场曲曲线

由于像散 $X_{TS}' = X_T' - X_S'$，故此有些光学公司在同时提供了子午场曲 X_T' 与弧矢场曲 X_S' 两条曲线后，即不再提供像散像差曲线。

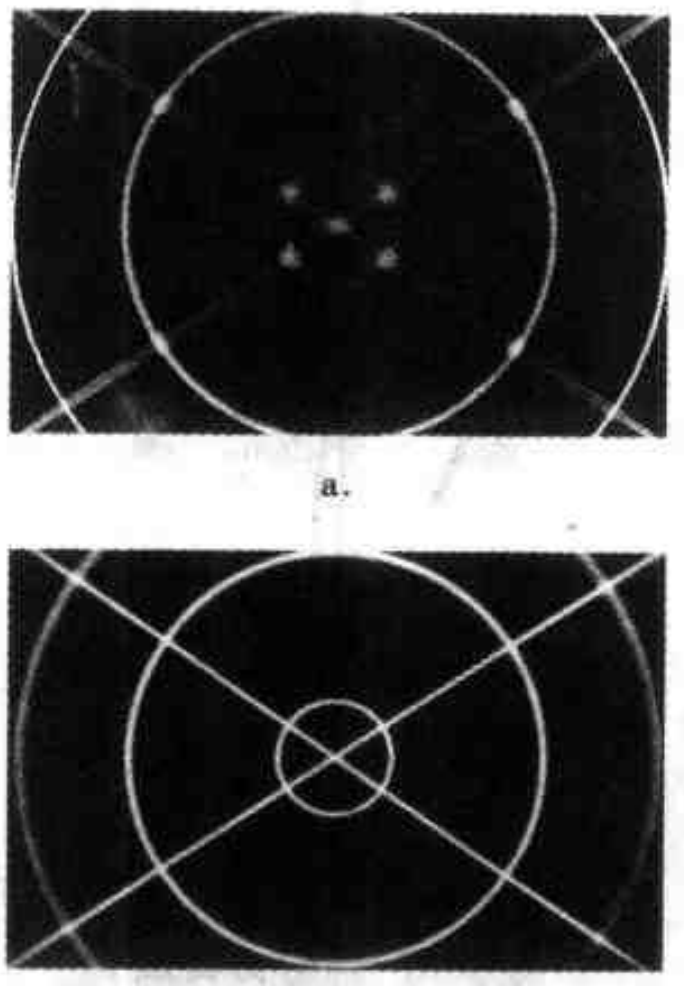
光学系统的平均场曲值指

$$X' = (X_T' + X_S')/2。$$

也有的场曲像差曲线以物方相对视场角 ω/ω_M 为纵坐标，以平均场曲 X' 为横坐标表示。场曲曲线的场曲值 X' 愈小愈好，即场曲像差曲线愈向纵坐标轴靠拢愈好。

用残存场曲像差的摄影镜头拍摄时，当调焦至画面中央处的影像清晰时，画面四周处的影像模糊；而当调焦至画面四周处的

影像清晰时，画面中央处的影像又开始模糊。如图 3—27 中所示。总之，无法在平直的像平面上获得中央与四周均清晰的影像。



a.

b.

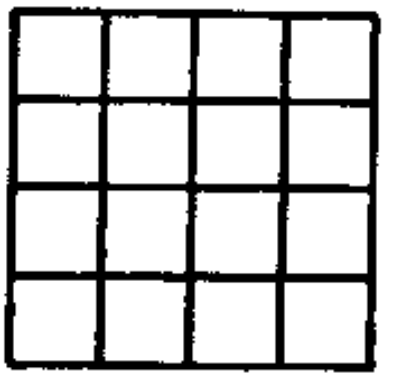
图 3—27 场曲影像

4. 畸变

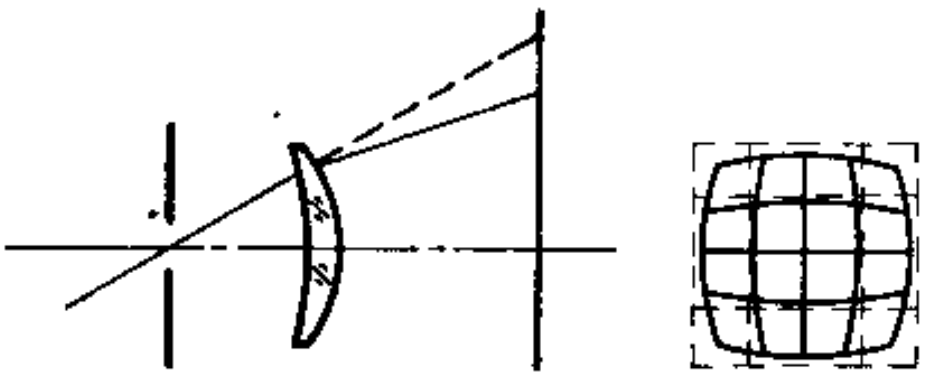
位于被摄物平面内不通过光轴的直线，经过光学系统成像后变为曲线，则此光学系统的成像误差称为**畸变**。

用有畸变像差的光学系统拍摄方格形的平面图形时，底片上的图形四边将变成向外鼓起的木桶形，或向里凹进的枕头形，前者称为桶形畸变（又称负畸变），后者称为枕形畸变（又称正畸变）。如图 3－28 所示。显然，愈靠近画幅边缘畸变愈明显。

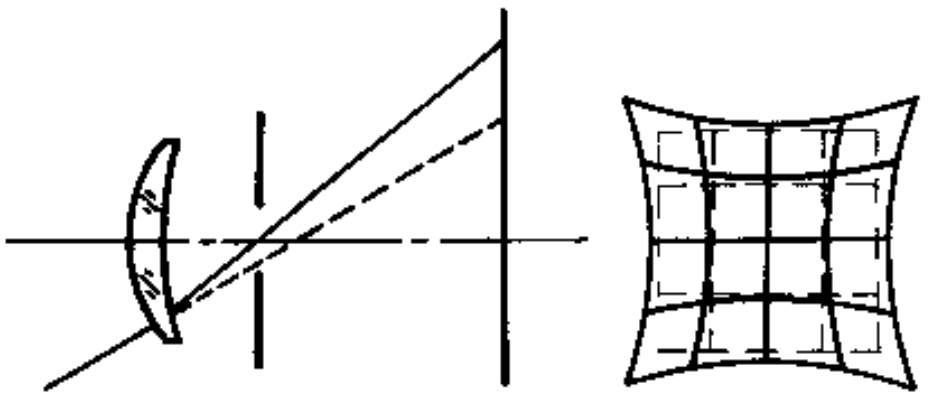
畸变像差只影响影像的几何形状，即影响影像与物体的相似



a.物体



b.桶形畸变



c.枕形畸变

图 3—28　畸变

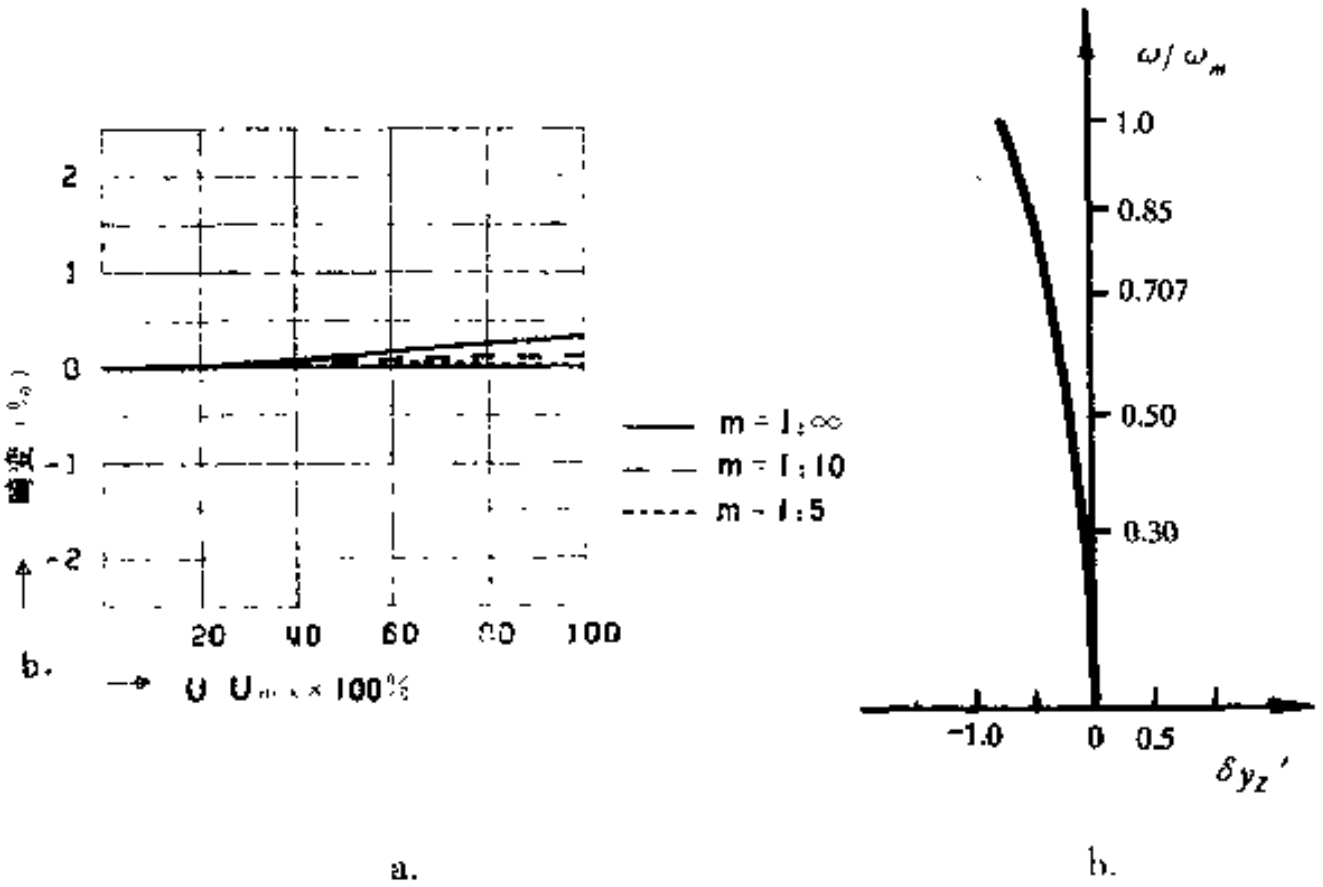
性，而并不影响影像的清晰程度。这是畸变像差与影响影像清晰度的球差、彗差、像散、场曲之间的根本区别。

轴外物点在理想像平而上所成实际弥散圆之中心的像高 y_z'，与其理想像点的像高 y_o' 之差，即实际弥散圆之中心与其

理想像点之间的距离，称为畸变 $\delta y_{z'}$。亦即

$$\delta y_{z'} = y_{z'} - y_{o'}。$$

畸变像差曲线一般用畸变 $\delta y_{z'}$（%）为纵坐标，以像场相对高度 U/U_m（指所测像点至光轴的距离 U 与最大像场半径 U_m 之比，）为横坐标表示。参见图 3—29a 中所示。也有人以相对视场角 ω/ω_m 为纵坐标，以畸变 $\delta y_{z'}$ 为横坐标，参见图 3—29b 中所示。



a.　　b.

图 3—29　畸变曲线

畸变曲线的畸变值（%）愈小愈好。显然，若畸变值 $\delta y_{z'}$ 为纵坐标，则畸变像差曲线愈趋向与横坐标轴重合愈好；若畸变

值 $\delta y_{z'}$ 为横坐标，则畸变像差曲线愈趋向与纵坐标轴重合愈好。

我国国家标准 GB9917－88 中规定照相用定焦距摄影镜头与变焦距摄影镜头，在画幅对角线方向上的畸变值应分别≤3%与5%。

在定焦距摄影镜头中，焦距愈短，愈易残存畸变像差。标准焦距摄影镜头与长焦距摄影镜头的畸变较易于校正，故此一般不易于看出有畸变像差。故此摄影者在选购短焦距摄影镜头（尤其是超广角摄影镜头）时，应注意检验该短焦距摄影镜头是否残存明显的畸变。

在变焦距摄影镜头中，则不存在上述规律。亦即有的变焦距摄影镜头在短焦距端残存有明显畸变，也有的变焦距摄影镜头在短焦距端的畸变校正得较好，而在变焦范围的中焦段或长焦段残存有较明显的畸变，故此摄影者在选购变焦距摄影镜头时，应注意检验整个变焦范围之内是否均无明显的畸变。

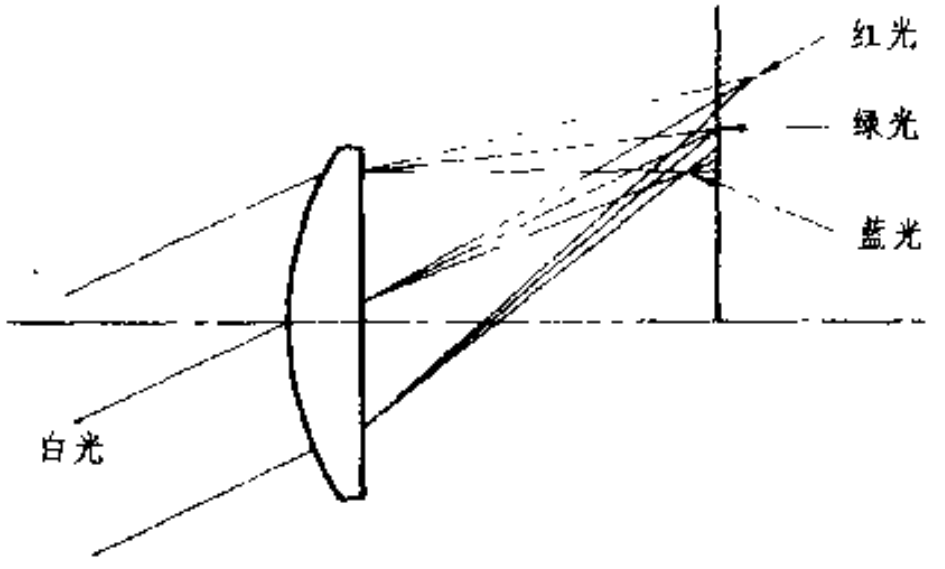
5. 色差

由白色物点向光学系统发出一束白光，经光学系统折射后，组成该束白光的红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等各色光，不能会聚于同一点上，即白色物点不能结成一白色像点，而结成一彩色像斑的成像误差，称为**色差**（参见作者所著《摄影滤光镜的性能与使用》一书书末彩色附图 2 所示）。

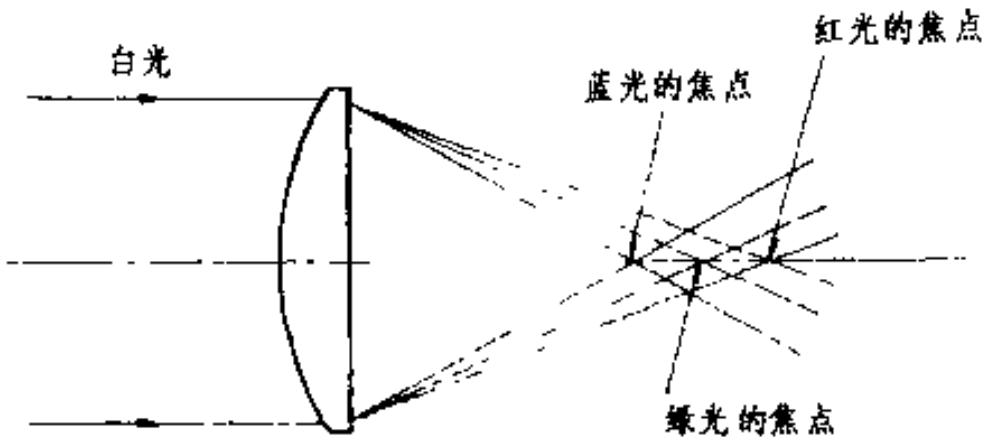
产生色差的原因如下：色光的颜色不同，其波长与传播速度也就不同。由于同一光学玻璃对不同波长光线的折射率有所不同，其中短波光折射率较大，长波光折射率较小。所以不同波长的色光通过同一单片透镜时，产生的折射程度必然不一致，于是使同一白光物点所发出的各色光在通过同一透镜后，将不能会聚于同一像点处。

色差又分**轴向色差**（又称位置色差、纵向色差）与**垂轴色差**（又称倍率色差、放大率色差）两种。

轴向色差将使同一物平面上的不同颜色部位，无法在理想像平面上同时获得最清晰的彩色影像，而白色物点将呈现为弥散色斑。参见图 3—30b 中所示。



a.垂轴色差



b.轴向色差

图 3—30 色差

光学界一般将 F 光像平面与 C 光像平面之间的距离，称为轴向色差 $\Delta L_{FC}'$。设 F、C 光两像平面各自至光学系统最后一片透镜表面之间的距离分别为 L_F'、L_C'，则

$$\Delta L_{FC}' = L_F' - L_C'$$

校正轴向色差（即位置色差）需要在某一视场将所选两种色光的轴向色差校正为零。若残余轴向色差为负时，表示色差校正不足；反之若残余轴向色差为正时，表示色差校正过度。

轴向色差曲线一般以相对入射高度 h/h_m（或 $\sin U/\sin U_m$）为纵坐标，以轴向色差 $\Delta L_{FC}'$ 为横坐标表示。摄影者希望轴向色差曲线愈接近与纵坐标轴重合愈好。

图3—31 中所示为某光学系统的轴向色差曲线。由图中 0.707 带光处 $\Delta L_{FC}'=0$ 可知，该光学系统在 0.707 带光处校正了色差。

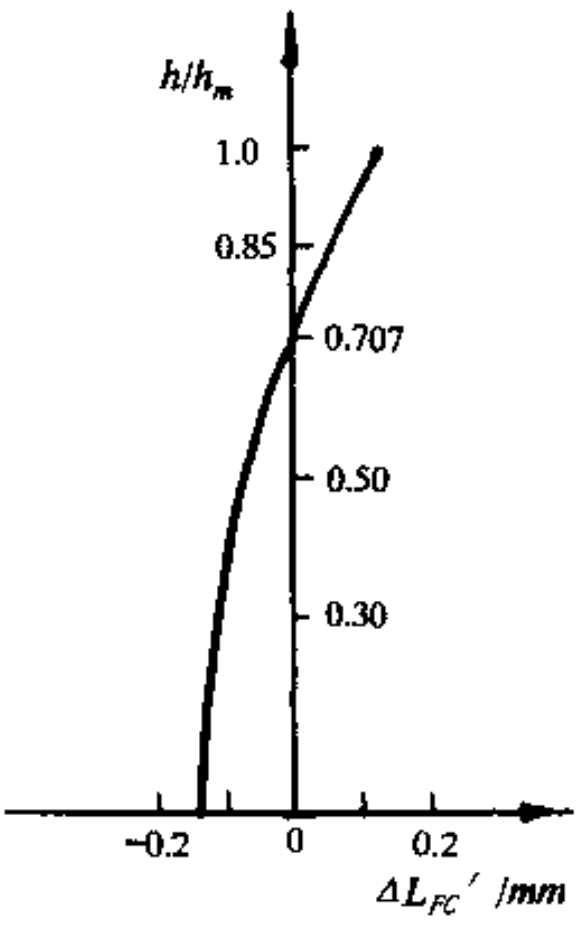


图 3—31 轴向色差曲线

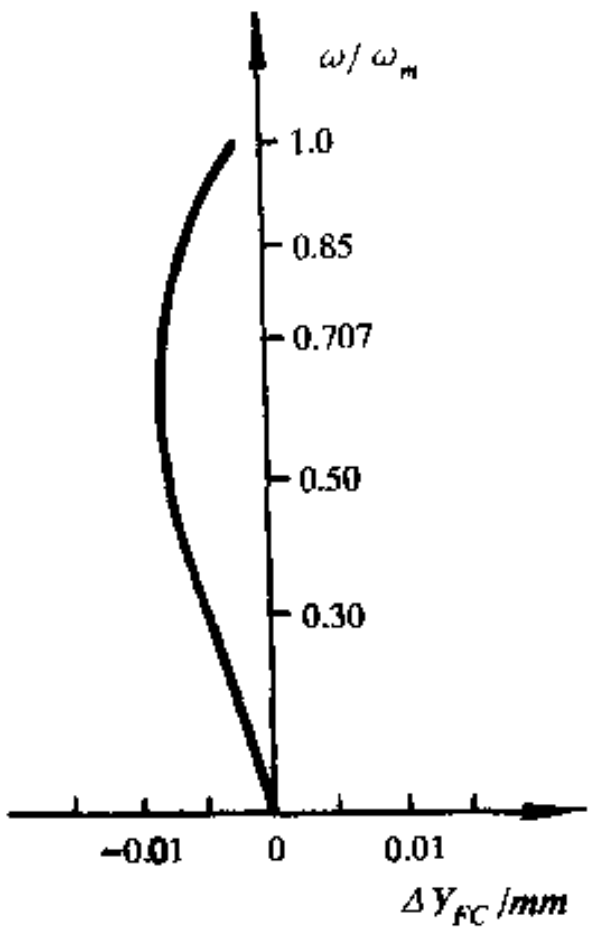


图 3－32 垂轴色差曲线

垂轴色差将使轴外同一物点的各色光具有不同的影像放大率，使各色光的像点在像平面上彼此不重合（参见图 3－30a 中所示），从而导致物体所结成的影像模糊，清晰度下降。当垂轴

色差严重时，甚至将造成位于视场边缘之物体的影像呈现出彩色边缘，致使影像显著模糊。

对于对称式的光学结构，当 $m = -1$ 时，光阑前的前组透镜与光阑后的后组透镜各自产生的垂轴色差的数值相等，符号相反，故此此时该光学系统的总垂轴色差得以自动消除。

垂轴色差一般用 F 光与 C 光在同一理想像平面上的像高之差 $\Delta Y_{FC}'$ 表示。即

$$\Delta Y_{FC}' = Y_{ZF}' - Y_{ZC}'$$

垂轴色差曲线一般以物方相对视场角 ω/ω_M 为纵坐标，以垂轴色差 $\Delta Y_{FC}'$ 为横坐标表示。参见图 3－32 中所示。摄影者希望垂轴色差曲线愈接近与纵坐标轴重合愈好。

当对光学系统的 0.707 带孔径校正了 F 光线与 C 光线的色差后，如果 F 光线的球差 $\delta L_F'$ 与 C 光线的球差 $\delta L_C'$ 二者彼此不相等，则二者之差值 $\delta L_F' - \delta L_C'$ 称为**色球差**。

当对光学系统的 0.707 带光校正了 F 光与 C 光的轴向色差，使 $\Delta L_{FC}' = 0$ 后，F 光、C 光的公共交点，有时并不和带孔径 D 光的交点相重合，上述 F 光、C 光的交点至 D 光曲线之间的水平距离称为**二级光谱** $\Delta L_{FCD}'$。

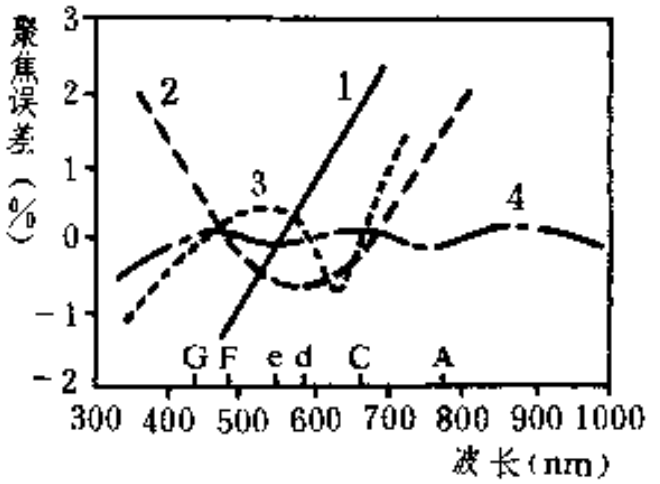
在光学系统的色差校正中，色球差与二级光谱的校正较为困难。

消除二级光谱的摄影镜头，即同时校正了三种色光（如 F、C、D 光）之色差的摄影镜头，称为**复消色差摄影镜头**，又称 APO（APOCHROMATIC）摄影镜头。

二级光谱参见图 3－19 中所示。图中 D 曲线为 D 光的球差 $\delta L'$，F 曲线为 F 光的球差 $\delta L_F'$，C 曲线为 C 光的球差 $\delta L_C'$，F 曲线与 C 曲线在 0.707 带相交表示二色光在 0.707 带校正了色差，而该 F 曲线与 C 曲线的交点与 D 光曲线之间的间距即为二级光

谱 $\Delta l_{FCD}'$。

能对两种色光（如红色 C 光线与青色 F 光线）校正色差的光学系统，称为稳定的消色差系统；能对三种色光（如红色 C 光线、黄色 D 光线、青色 F 光线）校正色差的光学系统，称为复消色差系统，所谓的 APO 摄影镜头即为复消色差系统；能对四种色光（如红色 C 光线、黄色 D 光线、青色 F 光线、红外线）校正色差的光学系统，称为超消色差系统。参见图 3—33 中所示。



1.未校正色差　2.稳定消色差
3.复消色差　　4.超消色差

图 3—33　摄影镜头的色差校正曲线

在现代的摄影镜头中，一般均能对两种色光校正色差。

用色差较大的光学系统拍摄彩色景物时，将明显影响所摄影像的清晰度、明锐度、对比度及彩色的逼真程度。

二、像差的校正

为了获得理想的影像，需对光学系统的像差进行校正，而且校正后的残存像差愈小愈好。

目视光学系统（如望远镜、显微镜）一般对人眼较为敏感的

黄色 D 光线（或黄色 d 光线亦或绿色 e 光线）校正单色像差，对靠近可见光谱两边缘的红色 C 光线与青色 F 光线校正色差。

摄影镜头一般对黄色 D 光线（或黄色 d 光线）校正单色像差，同时适当兼顾靛蓝色 G′光线的像差校正，对红色 C 光线与青色 F 光线校正色差。

校正像差的主要措施如下：

1）合理选择摄影镜头的光学结构形式，例如，双高斯型摄影镜头的成像质量比天塞型摄影镜头好，而后者又比三片式柯克镜头好。又如，对称性的光学结构有利于自动消除畸变。

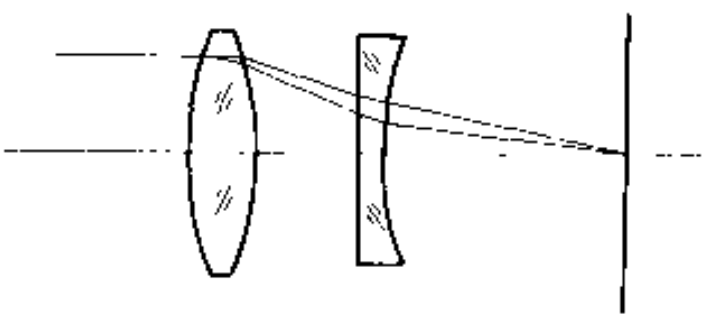
2）合理设计各透镜的形状、尺寸和位置关系（间距大小）。

3）合理选择各透镜的材料（如折射率和色散）。

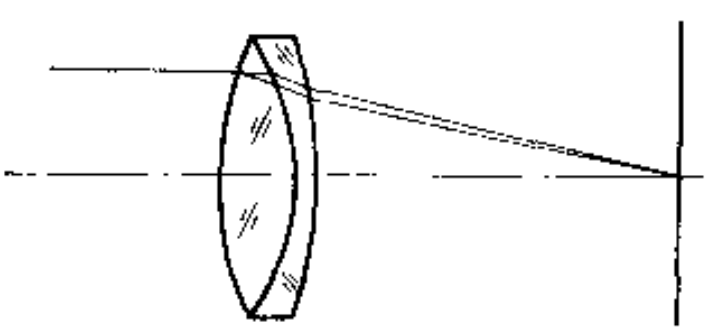
为了校正色差，可选用不同色散的镜片，以便使两镜片之正、负色差彼此抵消。透镜组的校正色差原理如图 3—34 所示。同时还研制出了极低色散光学玻璃（如 ED 或 UD、LD、AD 玻璃）。

一些非对称性短焦距摄影镜头，为校正近距离摄影时增大的像差，在调焦时采用了对内部部分透镜组元进行附加补偿调整的措施。

为了更好地校正球差和畸变等像差，进一步提高所摄影像的清晰度和反差，近年来出现了具有非球面透镜片（ASPHERICAL）的摄影镜头。例如：佳能 FD24 毫米、F1.4L 型，FD50 毫米、F1.2L 型摄影镜头。非球面透镜能校正球差的原理如下：由于非球面透镜的表面为特殊回转曲面，当一束与光轴平行的光线投射到该非球面透镜处后，上述特殊回转曲面可使通过该透镜边缘的光线与通过透镜中心的光线，均精确地会聚到透镜光轴的同一点上，从而使该非球面透镜自动校正了球差。参见图 3—35 中所示。非球面透镜还可适当改善畸变像差。



a.分立透镜



b.胶合透镜

图 3—34　校正色差

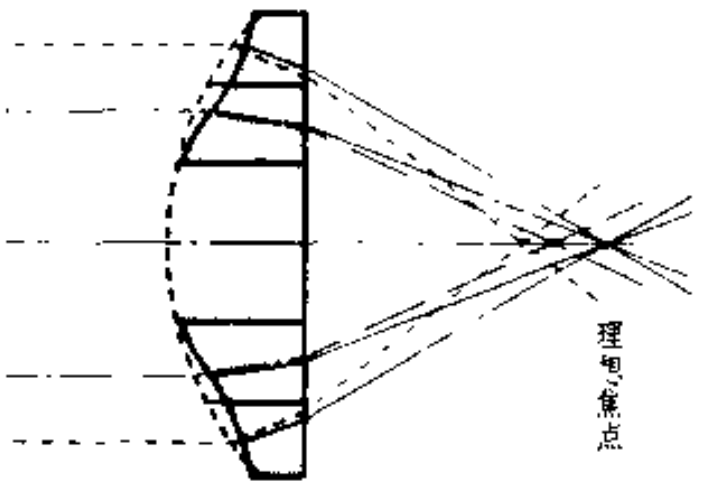
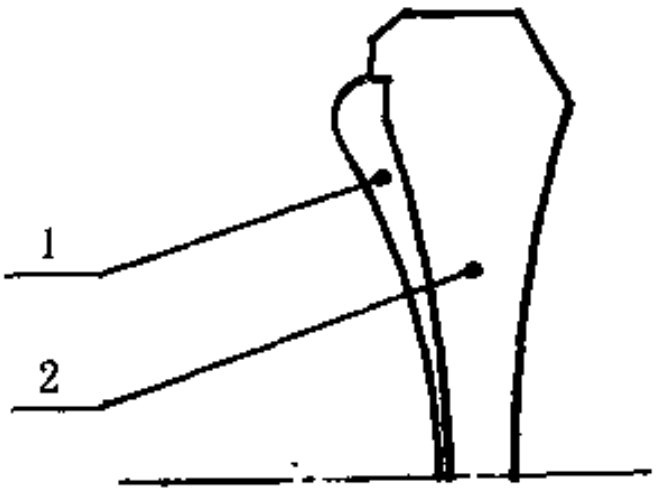


图 3—35　非球面透镜的校正球差原理

非球面透镜的表面精度要求很高，加工难度很大，故此采用非球面透镜之摄影镜头的价格非常昂贵。

近年，有的厂家采用光学玻璃精密热压成型技术，取代了精密机械加工技术来加工透镜的非球面，从而明显地提高了非球面透镜的加工生产率。

日本旭光学公司近年采用了通过由金刚石刀具与超精密数控机床制成的超高精度非球面成型金属模具（其形状加工精度在0.1μm之内），在传统玻璃球面透镜的表面，涂敷上一层光学塑料而形成一层非球面层，制成了复合型非球面透镜。例如潘太克斯（Pentax）FA 24mm F2.0 AL［IF］摄影镜头中即采用了这类复合型非球面透镜，参见图3－36中所示。而尼康公司则采用先把玻璃透镜表面经特殊粗磨加工工艺加工成非球面衬底，再用超高精度的非球面成型模具，把厚度仅几十微米的光学塑料成型于上述非球面玻璃衬底上。美能达公司为了预防光学树脂固化时的收缩力对玻璃产生影响，以及下降环境温度对摄影镜头性能的不利影响，采用了在玻璃球面透镜的表面，经超高精度非球面成型模具先后涂敷上二层光学塑料而形成非球面，所涂敷上的光学塑料的固化，采用对模具寿命影响极小的紫外线常温固化方式。



1. 非球面光学塑料涂敷层　　2. 光学玻璃透镜

图3—36　复合型非球面透镜

能够对全部六种像差进行校正的摄影镜头，称为正光摄影镜头，又称消像散摄影镜头。世界上第一只消像散摄影镜头为德国卡尔·蔡司公司生产的Zeiss Protar摄影镜头。

在实际摄影时，调焦距离刻度上自无限远至20倍焦距值处，

甚至至 10 倍焦距值处都会使用到。因此，设计者对无限远物体进行像差校正时，必须同时预先估计到物体移至近距离处时像差的变化情况，并兼顾之。而对一般常用的 51 倍焦距值左右的距离上，尤应保证能获得优良的成像质量。

变焦距摄影镜头和采用内调焦装置的长焦距摄影镜头，由于是利用光学系统中某些组元的移动进行调焦的，故设计时应注意防止调焦中像差的增大和渐晕现象的加剧。

摄影者在拍摄画面时，为了适应人们观察的习惯，一般多将欲表现的主体内容安排在画面中心附近的位置上，因此摄影者要求围绕像场中心的 50% 像场范围内，应具有很高的成像质量，同时要求其周围的 25% 像场范围内有较好的像质，并希望能适当照顾画面的边缘，使之具有相应的像质，以保证整个画面的完整性。

三、分辨率与成像质量的评价

摄影镜头成像质量（简称像质）的优劣，直接影响和决定着所摄底片的技术质量。

多数摄影者在评价摄影镜头成像质量的优劣时，习惯于采用**拍摄对比法**：用不同摄影镜头拍摄影调、层次丰富、细节明晰的同一景物，并在同样条件下高倍放大成同放大率的照片，然后用眼睛直接观察所摄照片上的影像细部，其中对景物细部再现能力较其它摄影镜头高者，说明成像质量较其它镜头好。此成像质量评价方法虽简便易行，但获得的只是一具有相对性的评价结果，误差较大。故尚需进行精确的定性和定量评价。

评价摄影镜头成像质量优劣的科学方法很多，目前应用最广

泛的方法有："分辨率"、"星点检验"、"光学传递函数"三种[①]。

分辨率（Resolution、Resolving Power）又称**鉴别率**，日文称为解像力，指摄影镜头清晰分辨被摄景物纤微细节的能力，故摄影镜头的分辨率愈高愈好。

摄影镜头的分辨率 R，一般指在精确调焦后的像平面上，1 毫米宽度内能分辨开的最细密的黑白相间的等宽线条对数（黑白线条等宽有利于比较），其单位为**"线对/毫米"**（Lp/mm）。

由上述分辨率 R 的定义可知，分辨率 R 等于两像点能被摄影镜头分辨开时的最小间距 b 的倒数。即

$$R = 1/b \tag{3—13}$$

该分辨率数值愈大，则分辨率愈高。显然，分辨率法属于定量评价法。

由于光具有衍射现象，因而点光源经理想光学系统所结成的实际影像并非一像点，而是一个具有一定面积的衍射光斑——由中央亮斑及其周围的若干同心光环所组成。在衍射光斑中，中央亮斑集中了全部成像光线能量的 80% 以上，故最明亮；而各光环能量少、故自内至外逐渐暗淡。衍射光斑又称爱里（Airy）斑，参见图 3—37 所示。

当二个点光源各自所成衍射像之间的距离太小时，人眼将无法分辨开二衍射像，而视为一体。

两个点光源之衍射像能被人眼分辨开的最小间距（即两个点光源衍射像可被人眼分辨开的最小中心距）b，可由下述理想光学系统的衍射分辨率公式求出。

$$b = \frac{0.61\lambda}{n' \sin\omega'_{max}} \tag{3—14}$$

---

① 至于"中心点亮度"、"点列图"、"瑞利判断"三种方法，因前二者需进行繁琐的计算，后者又需在设计计算结果的基础上进行，故此三种方法对摄影界无实用意义。

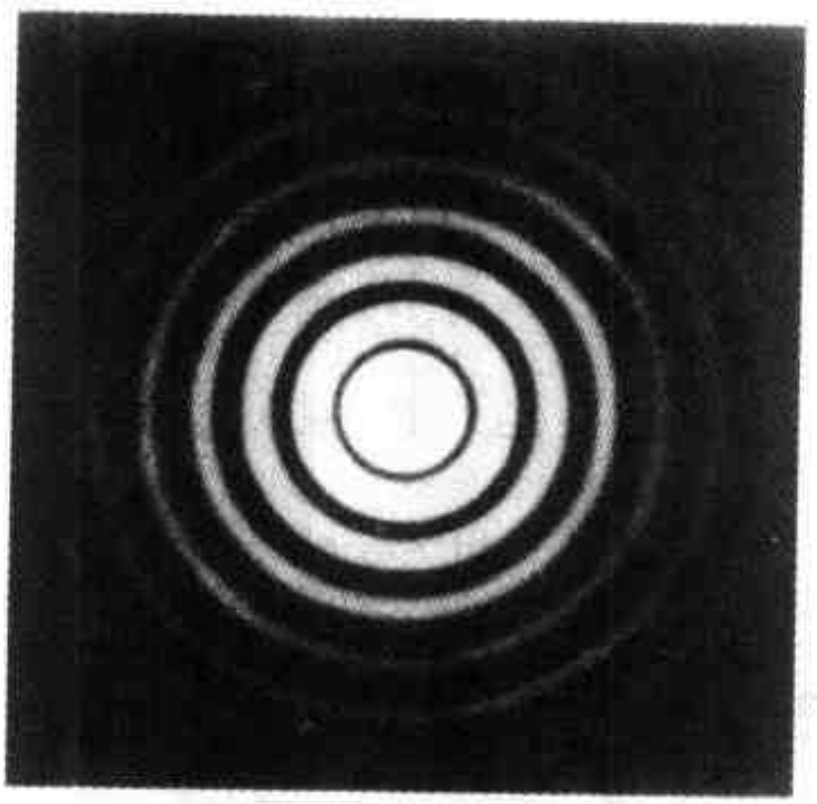


图 3—37　衍射光斑

式中 λ 为光波波长

n' 为像空间介质折射率

ω'_{max} 为像方孔径角。

当摄影镜头对无限远成像，且像方空间为空气时

$$\sin\omega'_{max} \approx \frac{D_\lambda}{2f'}$$

$$n' = 1$$

代入

$$b = 1.22\lambda \frac{f'}{D_\lambda}$$

$$= 1.22\lambda F \qquad (3-15)$$

式中 D_λ 为人瞳直径

f' 为像方焦距

F 为光圈数。

显然，b 刚好为衍射光斑上第一个暗环的半径，如图 3－38 所示。

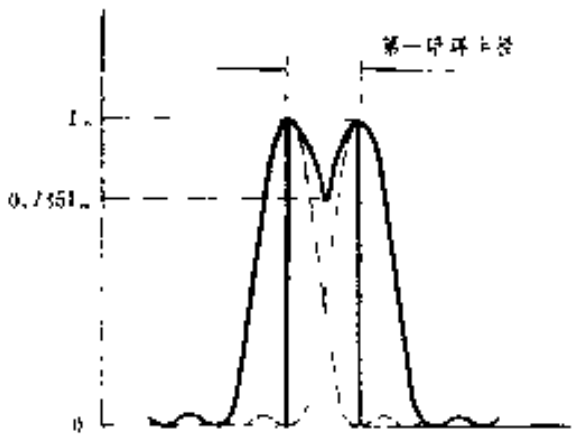


图 3—38

当成像光线的波长为 0.000555 毫米即为人眼最敏感的黄绿光时，理想摄影镜头的衍射分辨率 R 为

$$R = \frac{1}{b}$$

$$= 1477\ \frac{1}{F}$$

$$\approx \frac{1500}{F} \qquad (3-16)$$

此即摄影镜头的理论分辨率。

由公式（3—16）可知，摄影镜头的理论分辨率高低，仅与其相对孔径的大小有关：摄影镜头的相对孔径愈大、即光圈数愈小，其理论分辨率愈高。

由于实际摄影镜头上均残存有或大或小的种种像差，故其实际分辨率要远较上述理论分辨率值低很多。此外，摄影镜头边缘视场的分辨率值，明显低于中心视场的分辨率值。

当光学系统的相对孔径愈小时，衍射光环就显得愈大、愈明显，即衍射现象愈强烈；而当相对孔径愈大时，衍射光环反而显得相对愈小、愈不明显，即衍射现象愈微弱。故摄影镜头光圈收至过小时，衍射现象将逐渐明显。

由像差部分已知，适当收小光圈可减小球差和彗差，即减小

光晕，提高影像清晰度；现又知，光圈过小时，将由于衍射现象而降低影像清晰度。显然，在摄影镜头的光圈调节范围内必有一折衷位置，在该位置处球差、彗差和衍射现象相对均较小，此折衷位置的光圈数值称为该摄影镜头的“**最佳光圈**”。不同摄影镜头的最佳光圈往往并不相同，一般最佳光圈位于该摄影镜头最大光圈缩小约 3 级左右的位置上。例如，海鸥 DF135 单镜头反光照相机的 58 毫米、1:2 镜头，其最佳光圈为 f/5.6，此光圈大小刚好为该镜头最大光圈 f/2 缩小 3 级的位置上。某摄影镜头的最佳光圈大小可通过检测或实拍分析获知。摄影者应掌握自己所用各摄影镜头的最佳光圈值，以便拍摄出具有最佳影像质量的画面。

摄影者自己所用摄影镜头的具体最佳光圈的位置，可通过实拍方法测定，方法如下：针对同一被摄景物在精确调焦的前提下，以该摄影镜头最大光圈缩小 3 级后的位置拍摄一幅照片，再以其为基准依次缩小 1/3 级、2/3 级、1 级，开大 1/3 级、2/3 级、1 级、$1\frac{1}{3}$ 级、$1\frac{2}{3}$ 级、2 级后各拍摄一幅照片，然后针对各底片上同一局部进行高倍放大，比较各照片上同一局部影像的成像质量，最终从对比中判断出最佳光圈为哪一档。

摄影者所用放大机镜头的具体最佳光圈位置，可用下述放大照片的方法测定：找一段彻底跑光并冲洗后的底片片头，在全黑（不透光）的片头乳剂面上，用锐利的保险刀片轻轻划一下，要求刚好把乳剂层划透，形成一透光的锐利细线。然后把该底片乳剂面朝下装入放大机的底片夹中，用不同光圈高倍放大该划线（放大时在每张放大纸背面均记录下当所用的具体光圈值），经显影、定影后，比较各照片上哪一幅上黑线条的边缘最锐利、最黑白分明，则该幅照片当时所采用的具体光圈值即为此放大镜头的最佳光圈。

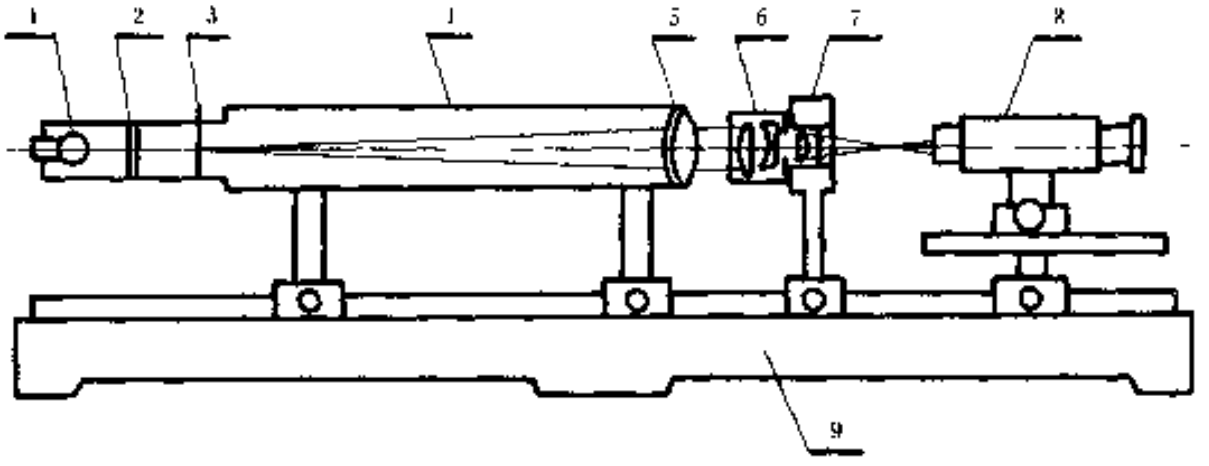
摄影镜头的新旧程度，对成像质量的影响很大，因此，摄影

者应认真维护摄影镜头。

检测摄影镜头分辨率高低的主要方法有下列二种：

（一）通过光学仪器目视检测

检验时所用的光学仪器一般为光具座。该光具座由照明器、检验标板、平行光管、被测镜头夹持器、测量显微镜（上述五部分的光轴彼此重合）及导轨座所共同组成。如图 3－39 所示。



1. 照明灯　2. 磨砂玻璃（检验分辨率用）或聚光镜（星点检验用）　3. 检验标板　4. 平行光管　5. 平行光管物镜　6. 被测镜头　7. 镜头夹持器　8. 测量显微镜　9. 导轨座

图 3—39　光具座

把分辨率板（检验标板）放置在平行光管的物方焦平面处。被灯光均匀照明的分辨率板，可经平行光管产生一个位于无限远的像，该像即成为被测摄影镜头的物。构成该无限远处的成像光线，经被测摄影镜头会聚后，在该镜头像方焦平面处结成一清晰的影像。摄影者通过测量显微镜，可看到该被放大了的分辨率板的影像。

常见分辨率板有二种类型：栅格状分辨率板，辐射状分辨率板（又称西门子星图 Siemens Star Chart）。

1. 栅格状分辨率板

栅格状分辨率板上的图案形式很多，美、英、日等各国并不

相同。我国国内目前普遍采用的是 WT1005-62 型标准图案，如图 3－40 所示。WT1005-62 型分辨率板共由 N_1 至 N_5 五块组成，每

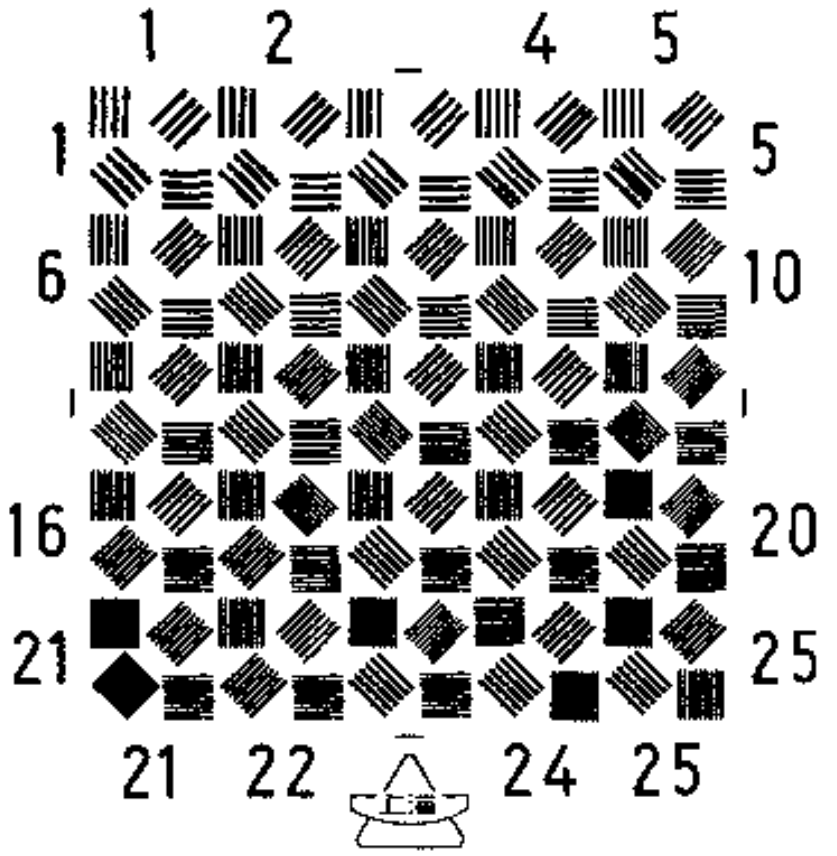


图 3—40　WT1005-62 型栅格状分辨率图案

块板上皆有 1 至 25 组栅格，每组由四个走向不同的栅格构成。每块分辨率板上，在图案左右（上下）两侧中央各有一短线，两线间的距离称为该图案基线长度 B，N_1、N_2、N_3、N_4、N_5 各板上的基线长度 B 分别为 1.2、2.4、4.8、9.6、19.2 毫米。每块分辨率板上第 1 组栅格中黑（或白）线条的宽度 b_1 为

$$b_1 = \frac{B}{120}$$

式中单位为毫米。每块分辨率板中，相邻两组栅格的线条宽度，以 $1/\sqrt[12]{2}$ 为公比的几何级数依次递减。因此，任一块分辨率板中之任一组栅格的线条宽度 b_{NK}，可由下式求出：

$$b_{NK} = \frac{0.01 \times 2^{N-1}}{\sqrt[12]{2^{k-1}}} \tag{3—17}$$

式中 N 为第几号分辨率板的序号

K 为该号分辨率板中的第几组栅格的编号。

上述 b_{NK} 宽度值，也可由有关表格中查出。

显然，在一组栅格中，相邻两黑（或白）线条的中心距为 $2b_{NK}$。

任一号分辨率板中任一组栅格所对应的目视分辨率值 R_L 为

$$R_L = \frac{f_0'}{2b_{NK}f'} \text{（线对/毫米）} \qquad (3—18)$$

式中 f_0' 为平行光管的物镜焦距

f' 为被测摄影镜头的焦距。

采用栅格状分辨率板测量时，测试者通过显微镜仔细观察并找出分辨率板的诸组栅格影像中，四个不同走向的栅格均能被分辨开的最细密的那一组栅格（观察中，倘若四个不同走向的栅格中，有一个走向的栅格不能被分辨开，则即认为该组栅格不可被分辨开），并记住其编号（同时要求所有比此可分辨开之最细密那组栅格粗疏的各组栅格中，不得有一组栅格为不可分辨开者）。然后根据序号 N 和编号 K，由公式（3－17）或查表求出该组栅格的线宽 b_{NK}。最后即可由公式（3－18）求出被测摄影镜头的目视分辨率值 R_L。（若 25 组均能清晰分辨，则改换序号较小的另一块分辨率板测量，余类推）。

2. 辐射状分辨率板

辐射状分辨率板上的图案系由一系列黑白相间的扇形条构成。如图 3—41 所示。其中黑（或白）扇形条的宽度 b，将随测量点沿扇形径向的位置变化而连续变化，即：

$$b = \frac{\pi d}{N} \qquad (3—19)$$

式中 N 为图案中黑与白扇形条的总数。

d 为测量点处的直径数值（为该点至扇形中心之距离的 2

倍)。

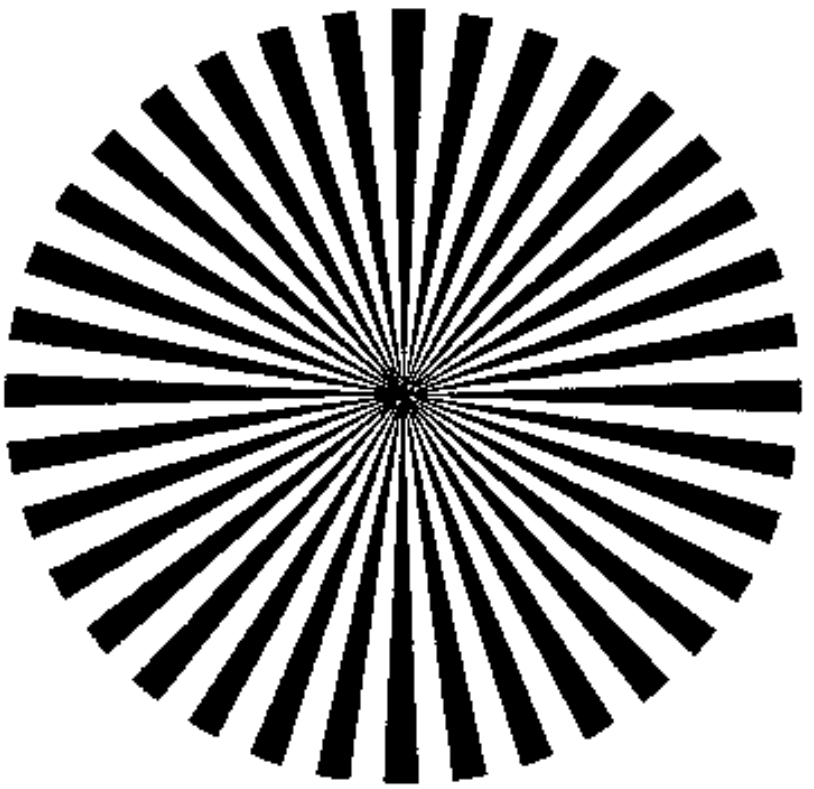


图 3—41　72 条式辐射状分辨率图案

相邻两黑（或白）扇形条的中心距 2b 为

$$2b = \frac{2\pi d}{N}$$

最常见的辐射状分辨率图案系由 72 个扇形条（即黑白 36 对）组成，每个扇形条所占的角度为 5°，即$\frac{\pi}{36}$弧度（参见图 3—41 所示)。国外偶而也可见 144 条和 36 条扇形条组成的图案。

把辐射状分辨率板和被测摄影镜头安装到光具座上检测时，在被测摄影镜头像方焦平面处，将结成辐射状图案的清晰影像。由于在像平面上，愈靠近图案中心，呈现出的扇形条愈细密，故必然会在距扇形中心的某一距离处，相邻扇形条密集到人眼无法分辨开，从而在图案中央部位形成一个无法辨认出扇形条的模糊圆斑。测试者可通过“测量显微镜”中的标尺，测得该模糊圆斑的直径 d，然后由下式计算出被测摄影镜头的目视分辨率值 R_L：

$$R_L = \frac{N}{2\pi d} \tag{3—20}$$

式中N 为辐射状分辨率图案中黑与白扇形条的总数

d 为辐射状分辨率图案影像上的模糊圆斑直径。

例如，72 条式辐射状分辨率板的目视分辨率公式为

$$R_L = \frac{36}{\pi d} \tag{3—21}$$

由于摄影镜头的视场较大，故除测其视场中心的目视分辨率外，一般尚需测其视场边缘处的目视分辨率值。

（二）通过所摄底片检测

用被测摄影镜头在精确调焦后拍摄分辨率标板，然后用 30 × 显微镜直接观察所摄底片上的影像（或通过高级幻灯机把所摄底片上的影像投影到银幕上进行观察），检查底片上每毫米范围内能清晰分辨开的线条对数。其中能分辨的线条对数愈多者，镜头的分辨率愈高。显然，这一方法所测量的分辨率数值，包含了感光胶片本身的分辨率因素，为减小胶片因素的影响，应选用微粒胶片，并进行标准曝光和标准微粒显影。

通过所摄底片检测所获得的分辨率值，称为摄影镜头的摄影分辨率 R_p。进行上述拍摄检测时，摄影分辨率 R_p 的计算公式为

$$R_p = \frac{1}{2bm} \tag{3 - 22}$$

式中 b 为分辨率图案上能被分辨开的最细密那一组栅格中的黑（或白）线条宽度，单位为毫米；

m 为拍摄时的影像放大率。

不同精度等级之摄影镜头的分辨率标准也不相同。

我国对 135 与 120 照相机用摄影镜头，规定了通过所摄底片检测摄影分辨率的国家标准 GB9917-88，参见表 3-10、表 3—11 中所示（表中的分辨率单位为线对/毫米）。

表 3—10　国家 135 照相机用摄影镜头的摄影分辨率标准

135 相机 (36 × 24) 焦距 f	级别	定焦镜头		变焦镜头	
		中心	边缘	中心	边缘
$f < 38$	J0	40	20	36	18
	J Ⅰ	36	18	32	16
	J Ⅱ	32	14	28	12
	J Ⅲ	28	11	25	9
$f = 38 \sim 61$	J0	40	25	36	22
	J Ⅰ	36	22	32	20
	J Ⅱ	32	16	28	14
	J Ⅲ	28	12	25	10
$61 < f < 135$	J0	36	25	32	22
	J Ⅰ	32	22	28	20
	J Ⅱ	28	16	25	14
	J Ⅲ	25	12	22	10
$f > 135$	J0	32	25	32	22
	J Ⅰ	28	22	28	20
	J Ⅱ	25	16	25	14
	J Ⅲ	22	12	22	10

表 3—11 国产 120 照相机用定焦距摄影镜头的摄影分辨率标准

120 相机（56 × 56）焦距 f	级别	中心	边缘
$f \leqslant 75$	J Ⅰ	28	14
	J Ⅱ	20	9
	J Ⅲ	16	6
$75 < f < 94.5$	J Ⅰ	28	16
	J Ⅱ	20	10
	J Ⅲ	16	7
$f \geqslant 95$	J Ⅰ	25	16
	J Ⅱ	20	10
	J Ⅲ	14	7

欲通过所摄底片的摄影分辨率高低检测摄影镜头成像质量时，必须在相应标准所规定的条件下，针对所规定的摄影分辨率测试版，进行拍摄并冲洗后仔细检测。

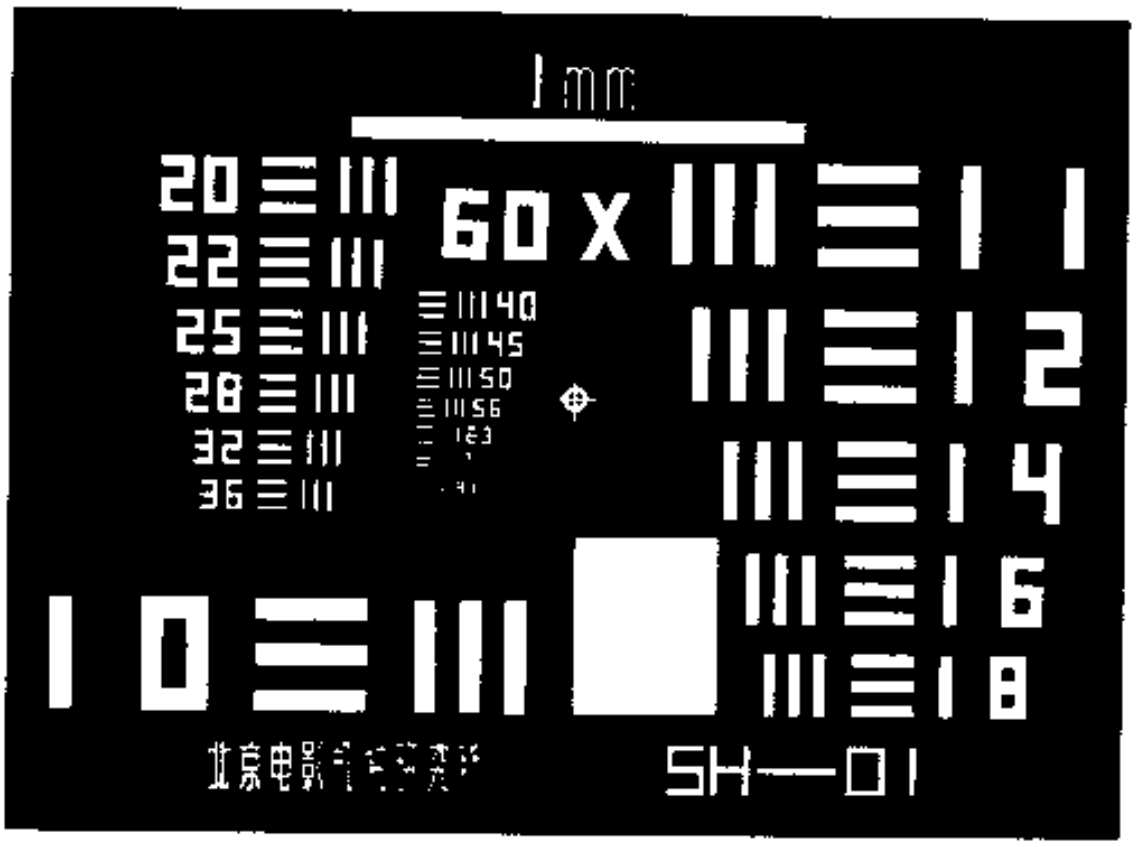
图 3—42　电影镜头用分辨率测试版

我国有关国家标准中规定，检测 35 毫米电影用摄影镜头成像质量高低的摄影分辨率测试版，有透射型与反射型两类。目前应用最多的为透射型分辨率测试版，参见图 3—42 中所示（此图示测试版为北京电影机械研究所研制的）。

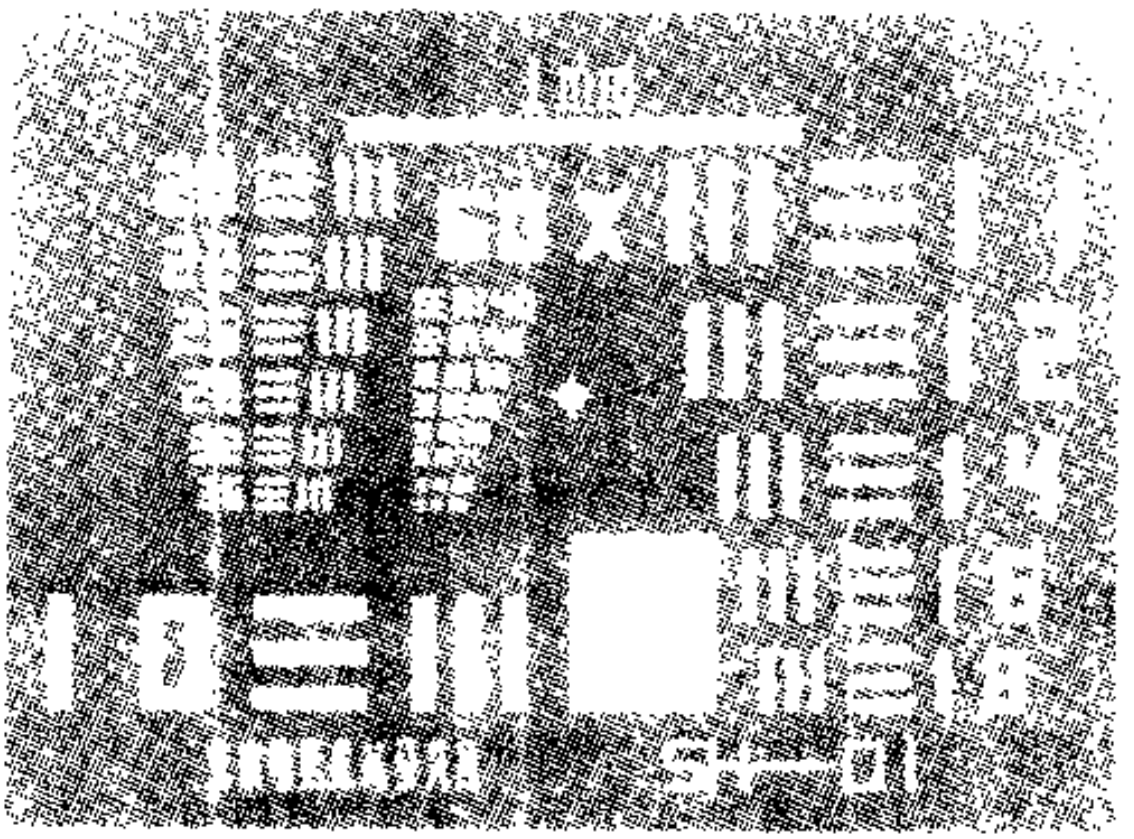
在国家标准中规定，检测电影摄影镜头分辨率的测试版上，应按图示位置要求，贴上符合国家标准 GB7552-87 要求的一系列摄影镜头分辨率测试图。参见图 3—43 中所示。该测试图由高反差与低反差两部分组成。

透射型分辨率测试图的高反差与低反差两部分，各自分别为白底黑线与白底灰线的图形，其中黑线与灰线的最大透射密度分别为 $\geqslant 2.00$、$\geqslant 0.4 \pm 0.05$，白底的最小透射密度均为 $\leqslant 0.08$。

反射型分辨率测试图的高反差与低反差部分，各自分别为黑底白线与灰底白线的图形，其中黑底与灰底的最大反射密度分别



a.



b.

图 3—43　摄影镜头分辨率测试图

为≥1.60、≥0.4±0.05，白线的最小反射密度应≤0.08。

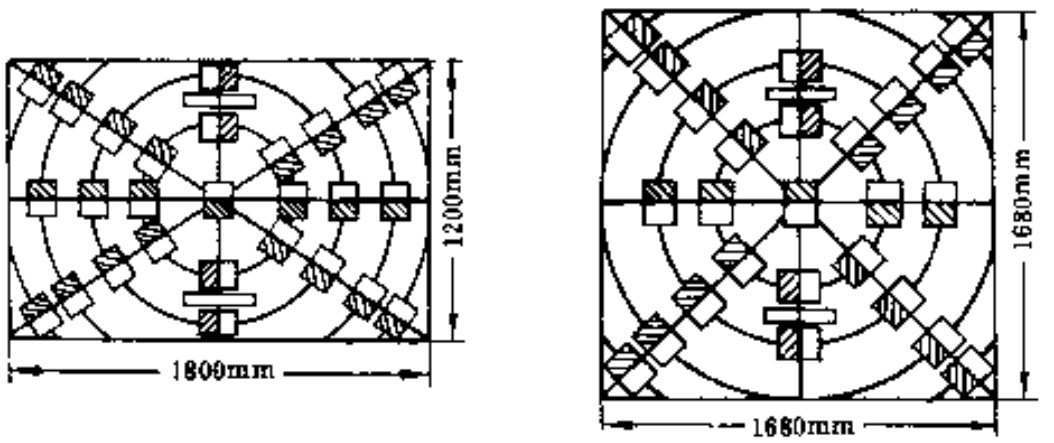
上述分辨率测试图中，每一级分辨率的图形分别由两组彼此互相垂直的“线对”组成。对于各级相邻分辨率图形，各“线对”彼此间之数值的公比为$\sqrt[20]{10}$。

当把图 3--43 中所示的摄影镜头分辨率测试图，按规定要求贴在分辨率测试版上后，每一级分辨率图形中的两组“线对”中，刚好有一组与过视场中心的径向线相垂直，此组“线对”所表示的即为该摄影镜头的子午光束分辨率，简称**子午分辨率**，又称**切向分辨率**（Tangential）；而另一组线条，刚好与过视场中心的径向线相平行，此组“线对”所表示的即为该摄影镜头的弧矢光束分辨率，简称**弧矢分辨率**，又称**径向分辨率**（Radial）。如图 3—44 中所示。

图 3—44 子午分辨率与弧矢分辨率

我国国家标准 GB7671-87 中规定，检测照相机摄影镜头用的分辨率测试版，如图 3—45 中所示。该测试版为反射型，测试版上也贴有图 3—43 中所示的分辨率测试图。

拍摄图 3—42 与图 3—45 所示分辨率测试版的要求如下：对该测试版的照明应均匀，摄影镜头的光轴应过测试版中心并与之垂直。电影摄影镜头与 135 照相机镜头的影像放大率应为 1∶50



a.　　b.

图 3—45　照相镜头用分辨率测试版

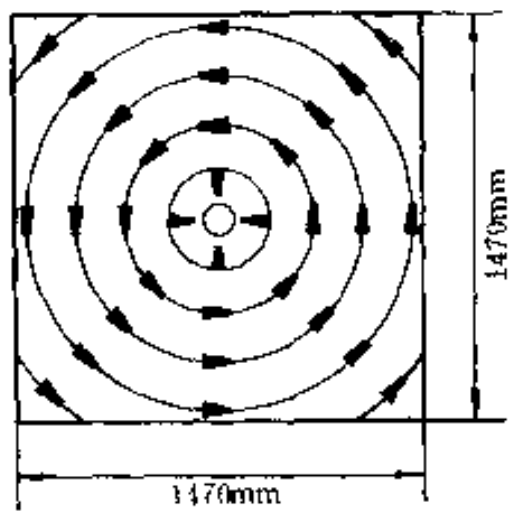
(此时摄影镜头的物距刚好为 51 倍焦距值，即物距系数 $l_f = 51$)，120 照相机镜头的影像放大率应为 1:30（此时摄影镜头的物距刚好为 31 倍焦距值，即物距系数 $l_f = 31$)。当影像放大率符合上述要求时，分辨率测试版上的框线，将刚好充满电影摄影机取景器内的画幅框线，或刚好充满照相机的曝光窗。

拍摄时应采用感光度为 ISO 100、分辨率达 95-120 线对/毫米的全色性感光胶片。为减少检测者手抖对分辨率的不利影响，获得真实结果，应将照相机稳妥地安装在牢固的三脚架上拍摄。

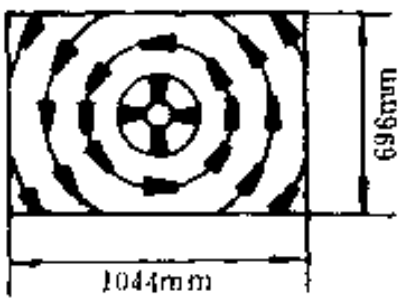
此外应将被测摄影镜头光圈开至最大，在精确调焦后正确曝光。尔后将所摄负片经标准显影、定影等冲洗加工，再用 30 × 至 50 × 显微镜目视检测该底片。

检测时，应自粗疏线对向细密线对逐级观察，找出两组线对均能清晰分辨开的最密的那级分辨率线对，该线对旁边所标注的数字，即为此摄影镜头的摄影分辨率。判断分辨率时，能清晰分辨开的最细密的那级分辨率线对，必须符合下列要求——所有比其粗疏的线对均能清晰地分辨开。倘若某级较细密的线对能够清晰分辨，而其相邻的那组较粗疏的线对不能够清晰分辨开，则该级较密的线对为伪分辨率，而非真正的摄影分辨率。

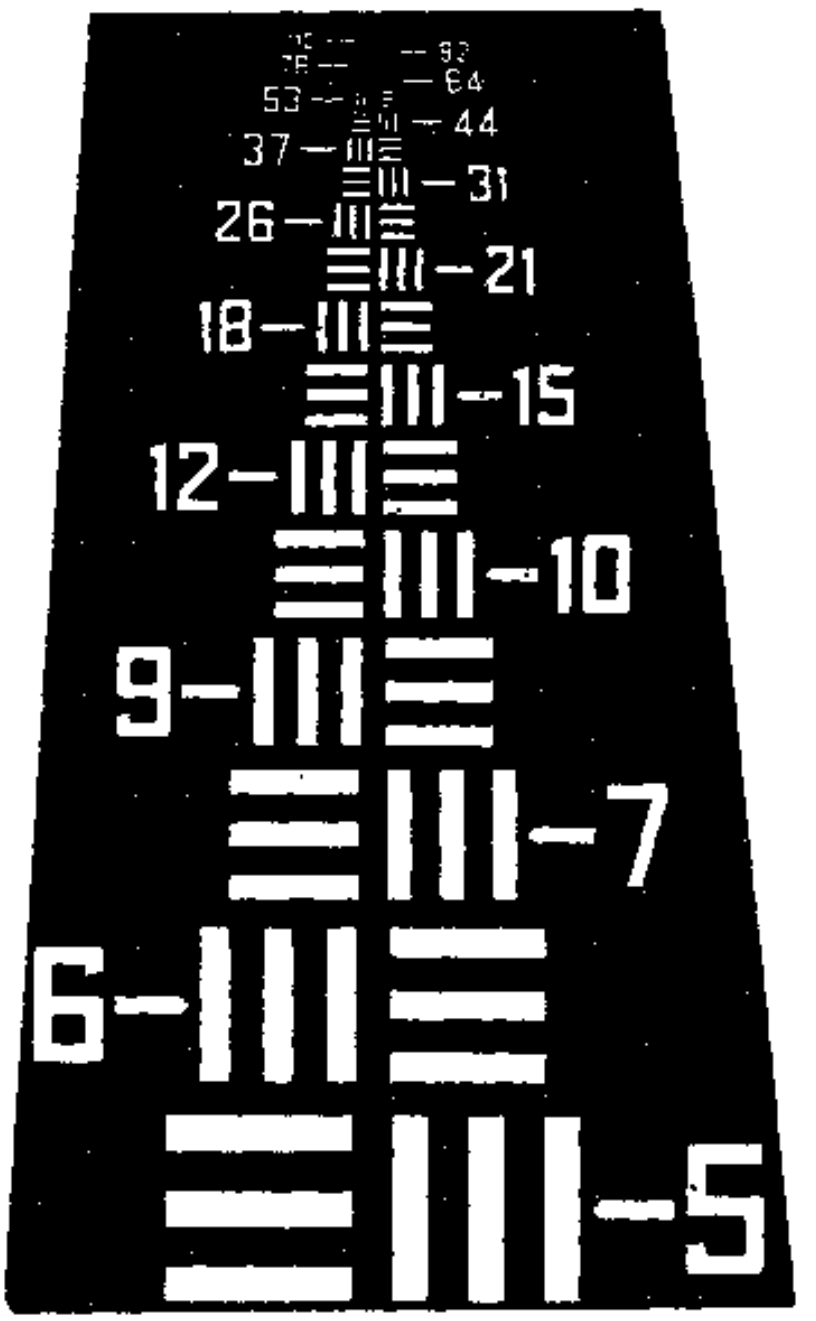
我国原部颁标准 JB745-65 中，规定的分辨测试板及其分辨率测试图如图 3－46 中所示。该分辨率测试图为黑底白线式反射型图形，各挡分辨率数值间的公比为 1.1994。拍摄时 135 照相镜头的影像放大率应为 1:29（此时摄影镜头的物距刚好为 30 倍焦距，即物距系数 $l_f = 30$）。



a.



b.



c.

图 3—46 JB45-65 标准中的分辨率测试板及其测试图

我国机械工业部针对摄影分辨率测试图，于 1994 年通过了

部颁标准 JB/T7473-94，以供在照相行业取代原国家标准 GB7552-87。在此部颁照相镜头用摄影分辨率测试图新标准中，规定图中各级分辨率数值间的公比仍为 $\sqrt[20]{10}$，即仍沿用 GB7552-87 标准中的规定，只是对分辨率线对的排列形式进行了改进——模拟 JB45-65 标准中的排列形式，设计成很长的宝塔形（该图形共分彼此相连的三部分，三部分中的线对自粗疏至细密，依次含 5－9 线对/毫米、10-16 线对/毫米、18-100 线对/毫米）。拍摄时要求 135 与 120 照相镜头的影像放大率分别为 1:49（此时摄影镜头的物距刚好为 50 倍焦距，即物距系数 $l_f = 50$），120 照相机镜头的影像放大率应为 1:29（此时摄影镜头头物距刚好为 30 倍焦距，即物距系数 $l_f = 30$）。遗憾的是 6 年多过去了，至今尚未批量制作出符合此新标准的分辨率测试图。照相行业目前一般还是沿用国家标准 GB7552-87 或部标 JB45-65 执行检测。

日本国的照相镜头用分辨率测试图，如图 3—47 中所示。

德国阿莱（ARRI）公司检测 35 毫米电影机用摄影镜头的分辨率测试版，如图 3—48 中所示。该测试版上的分辨率测试图由栅格形图案与辐射形图案共同组成。

电视摄像机的影像分辨率由于受其 CCD 传感器本身所含总像素数量的限制，因而电视摄像镜头的分辨率较电影摄影镜头的分辨率为低。例如，目前日本索尼（SONY）公司最先进的 DVW-790WSP 型数字 Betacam 摄录一体机，其所采用的 2/3 英寸光电传感器为 Power HADFIT 型 CCD，此 CCD 的总像素数仅为 62 万，若折合成 35 毫米电影摄影机的画幅，其极限影像分辨率才相当于 14 线对/毫米。显然，面对如此低的终极电视影像分辨率，没有必要设计出昂贵的高分辨率的电视摄像镜头。这也是电视摄像用变焦距摄影镜头的变焦倍率为什么普遍比电影用与照相用变焦距摄影镜头之变焦倍率大的缘故。

由表 3—10、表 3—11 中可知，摄影镜头之画幅中央的分辨

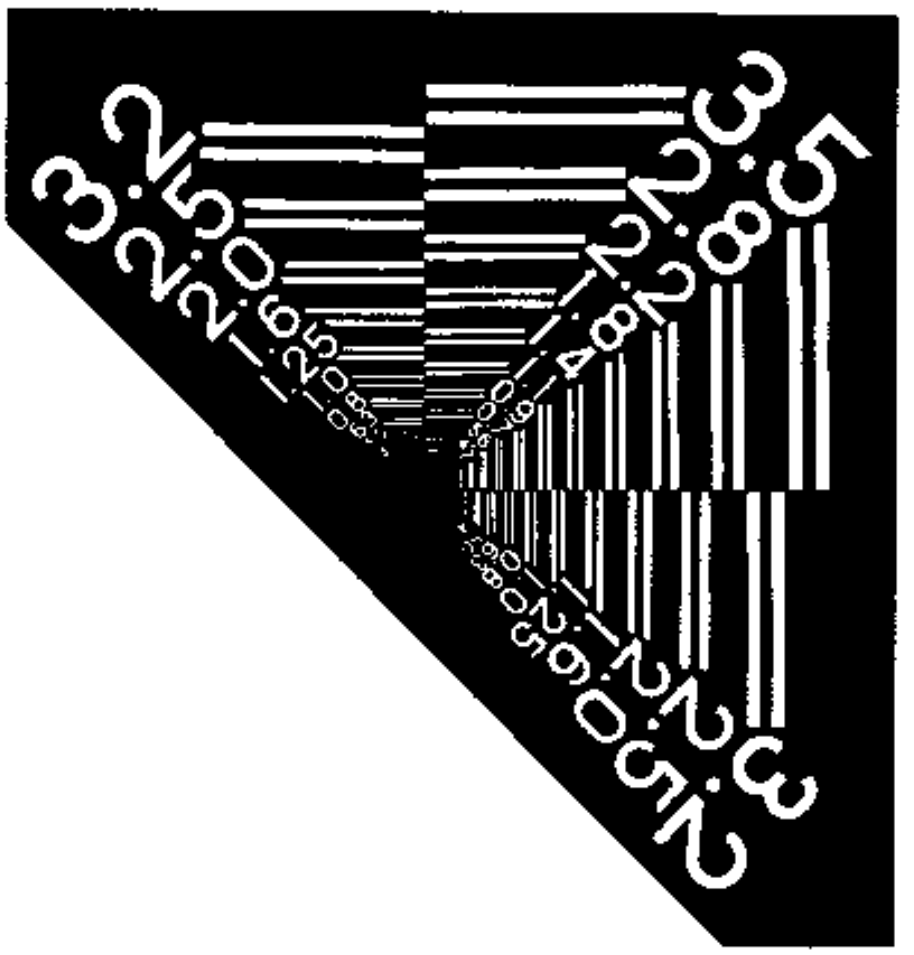


图 3—47 日本国的分辨率测试图

率精度，远较其画幅边缘的分辨率精度为高；同档次之定焦距摄影镜头的分辨率精度，远较变焦距摄影镜头的分辨率精度为高；画幅规格较小之照相机摄影镜头的分辨率精度，远较画幅规格较大之照相机摄影镜头的分辨率精度为高。

由表 3—10、表 3—11 中又可知，与同级别的标准焦距摄影镜头相比，短焦距摄影镜头像场中央的成像质量与标头相接近，像场边缘的成像质量有明显下降；而长焦距摄影镜头正好相反，像场边缘的成像质量与标头相接近，像场中央的成像质量明显下降。

由表 3—10 中还可知，135 照相机用焦距 50 毫米的 1 级标准摄影镜头，其中心视场的分辨率指标仅为 36 线对/毫米，并且边缘视场的分辨率指标还要低。而作为 1 级摄影镜头，其最大相对

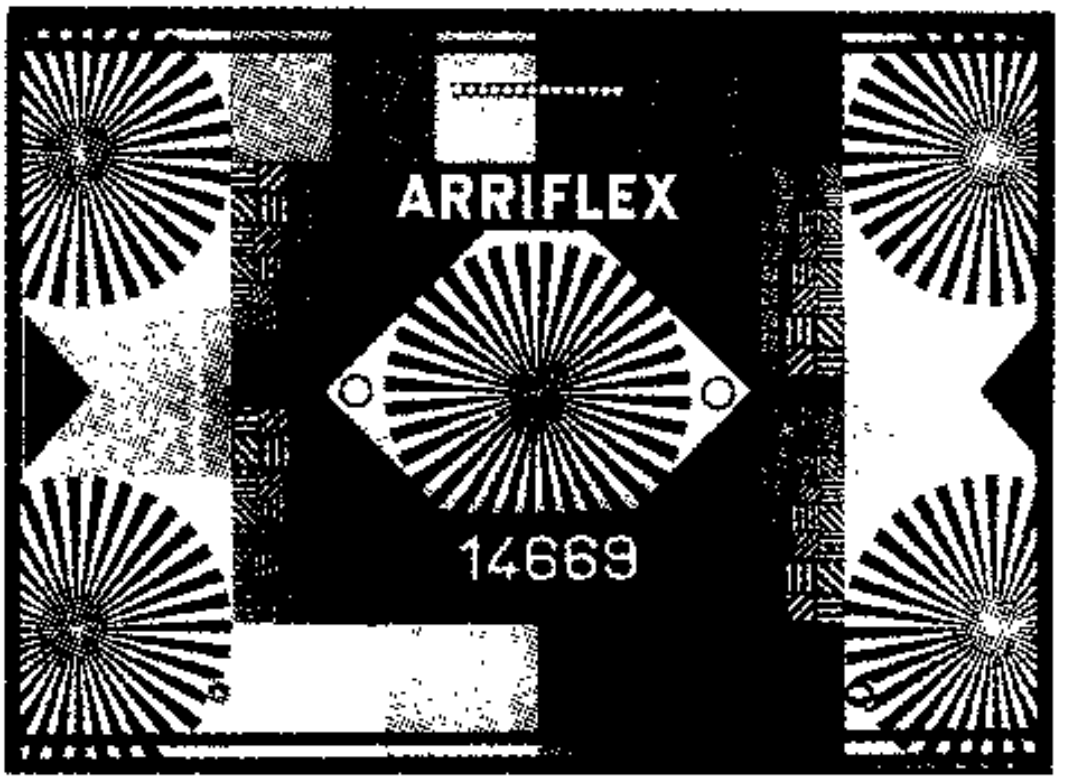


图 3—48　德国的分辨率测试版

孔径为 1∶2 时，该摄影镜头的理论分辨率值可高达 738 线对/毫米。显然，摄影镜头的摄影分辨率 R_P，远较其理论分辨率低。此外，因受感光胶片分辨率 R_F 的影响，摄影分辨率也比该镜头通过光学仪器检测的目视分辨率 R_L 低。

凯兹（Katz）先生针对摄影分辨率 R_P、目视分辨率 R_L，感光胶片分辨率 R_F 三者之间的关系，提出了下述关系式。

$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_F} \tag{3—23}$$

近期也有的学者认为，三种分辨率的关系式应为

$$\frac{1}{R_p^n} = \frac{1}{R_L^n} + \frac{1}{R_F^n} \tag{3—24}$$

式中 n 为指数，通常取 n 为 2 或 1.8。

摄影者通过有关摄影镜头资料，及其所介绍的摄影分辨率 R_p 的高低，评价该镜头的成像质量时，应注意下述现象：

1. 我国国家标准 GB9917-88 标准中规定的摄影分辨率指标

R_P（见表 3—10），系指用 GB100/21°、R_F 为 95 ~ 120 线对/毫米的胶片拍摄后的检测结果，而国外在介绍摄影分辨率 R_P 时，大多指用高分辨率感光胶片，即 R_F 为 150 ~ 200 线对/毫米的胶片拍摄后的检测结果。例如，我国部颁标准中的 $R_P \geqslant 36$ 线对/毫米，相当于国外标准中的 $R_P \geqslant 44.9 \sim 40.9$ 线对/毫米（$R_F = 200$ 线对/毫米时），或 $R_P \geqslant 41.8 \sim 38.3$ 线对/毫米（$R_F = 150$ 线对/毫米时）。

2. 在用 135 单镜头反光照相机进行拍摄测试中，由于曝光时照相机存在着由反光镜升起、光圈快速收缩、快门开启三种运动引起的机身之冲击震动——机震，而不同品牌照相机的机震大小及所用三脚架的稳固程度不同，再加上不同照相机机身的像面定位距尺寸并非均精确相同，故此常常会出现针对同一摄影镜头，不同人测出了不同的分辨率结果。为此，有人把高品质照相机固定在稳固的高品质三脚架上，在暗室中打开照相机 B 门，用 X 闪光灯的闪光能量控制负片的曝光量，以消除由机震所导致的测量误差。显然，用 B 门加闪光灯拍摄所测得的摄影镜头分辨率数值，又将比用普通拍摄方法所测得的分辨率数值为高。

比较目视与摄影分辨率检测法可知：前者测量精度高，但需借助专门光学仪器；后者简便易行，但误差略大。

通过分辨率评价成像质量的方法，具有定量判断的特点，便于摄影者进行对比。但通过此法不能准确判断出引起分辨率不高的具体原因，且易出现“伪分辨率”现象（即较疏的栅格已不能分辨了，面对某一较密栅格却能清晰分辨的现象）。更重要的是用此法评价出的结果有时与实际拍摄结果有差异（参见本节“五”中有关内容）。为此，摄影者依据分辨率高低评价摄影镜头成像质量时，一般应兼顾该摄影镜头所摄画面的视觉效果：影调的细腻、明锐程度，层次的丰富与否，色彩还原的好坏，有无畸

变……。

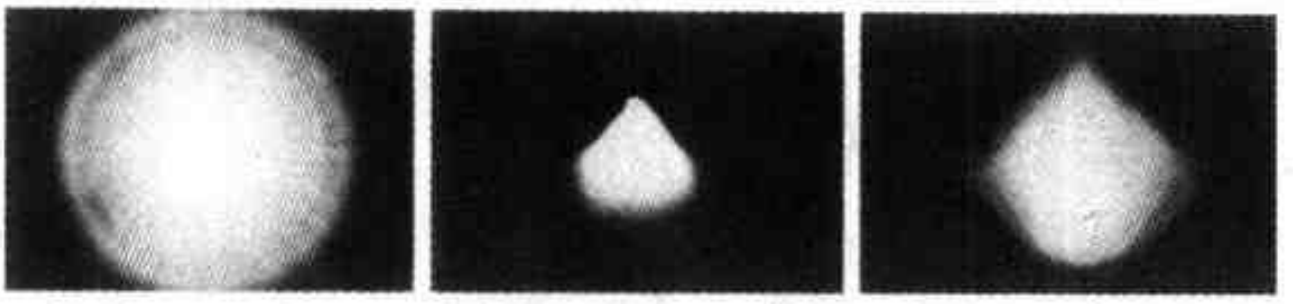
日本生产的某些摄影镜头的成像质量很好或比较好，但也有些厂家向中国出口之摄影镜头的成像质量比较差或非常差。其原因是“日本照相机和光学仪器检验协会（JCII）”对出口产品规定的成像质量标准极低所致。例如，日本 JCII 对 135 照相机（画幅对角线为 43.27mm）之摄影镜头，所规定的分辨率标准如下：定焦距摄影镜头的中心视场为 27.73 线对/毫米，边缘视场为 11.55 线对/毫米；变焦距摄影镜头的中心视场为 25.42 线对/毫米，边缘视场为 9.24 线对/毫米。将上述数字与表 3—10 所示数字相比可知，日本 JCII 对边缘视场的检验标准尚未达到中国三级（即最低档的）摄影镜头的标准。而在日本，这种质量的摄影镜头仍可以获准贴上椭圆形烫金的“合格品”标签（即 JCII 签发的 PASSED 标签）。因此，我们既应看到日本照相机工业水平普遍比较高的一面，也应看到日本出口的产品中，确实有相当数量的劣等品鱼目混珠其间，甚至日本一些著名厂家也曾向中国高价销售过一些劣质摄影镜头。而进入中国市场并贴着“合格品”标签的日本变焦距摄影镜头，有许多是日本委托海外小厂生产的儿童玩具型镜头。

四、星点检验与点列图

星点检验需借助专用光学仪器——光具座，且应用星点板取代分辨率板，另对光源还有所要求。

星点检验原理如下：使被测摄影镜头对无限远之点光源成像，然后通过测量显微镜观察该点光源所结成之衍射图像的具体形状和大小，通过比较此实际像与理想像之间的差异，可迅速评定出该摄影镜头的成像质量好坏，并可由上述差异分析出引起像差的具体因素。常见星点图的形状及其各自所表示的相应像差情

况，参见图 3—49 中所示。



a. 球差　　b. 彗差　　c. 像差

图 3—49　星点图

与其它评价方法相比，星点检验法具有下述特点：形象直观、灵敏度高、判断迅速，并可找出引起质量缺陷的原因，因而在光学工厂的生产测试中获得广泛应用；但此法需借助专门光学仪器，且只是定性检验，无法得出定量数值，观察结果还往往会受到不同观测者的主观因素影响，以至有所差异。

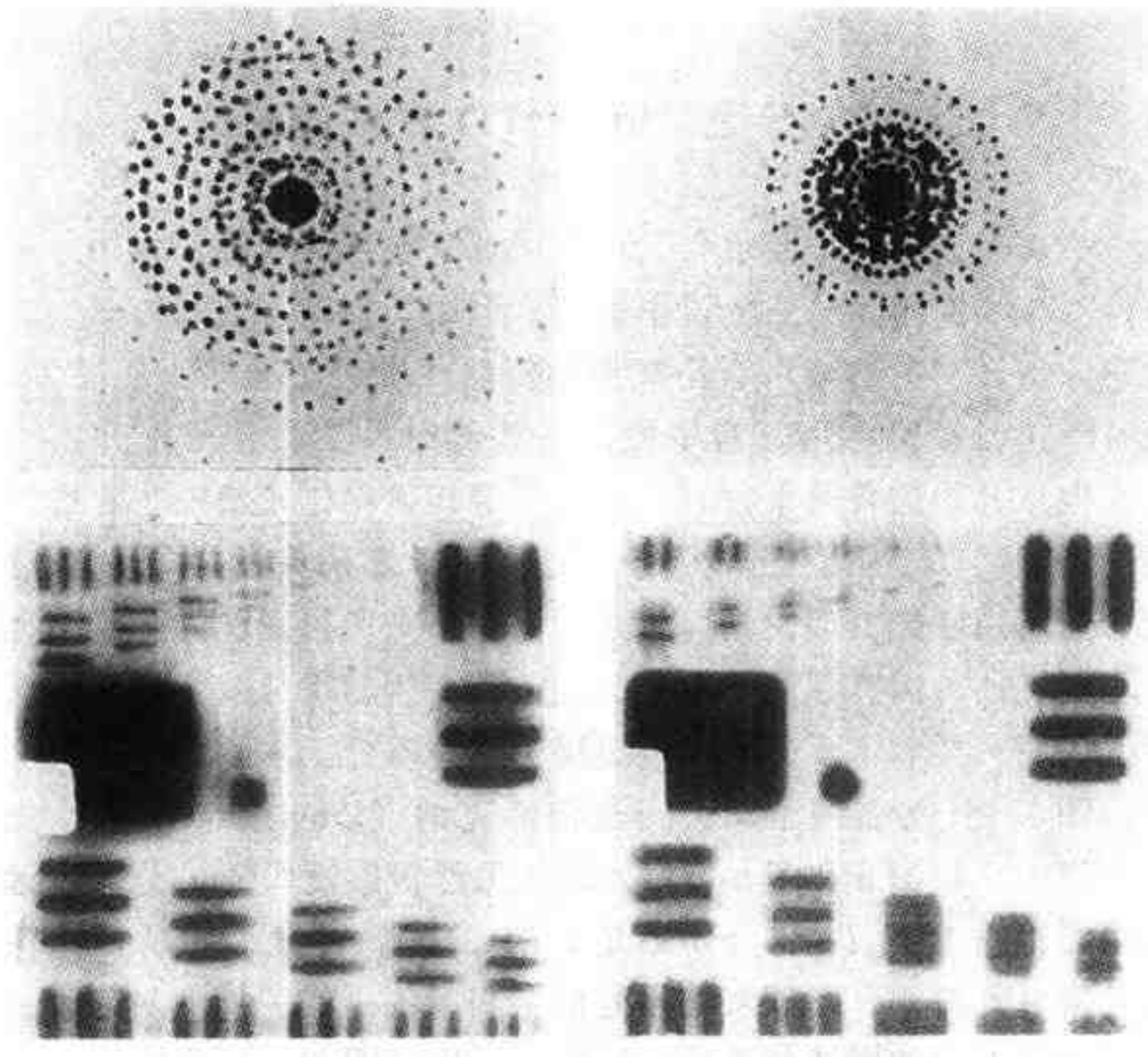
由一物点发出的一束光线进入摄影镜头后，存在于光学系统的像差，使得组成该光束的各条光线形成了一个散布在一定范围内的弥散图形，而未能会聚于像平面上的同一点上。上述由一系列像点组成的弥散图形称为点列图，参见图 3—50 中 a 图与 c 图所示。

点列图需经过对大量光线的光路进行计算（一般需计算上百条甚至数百条光线），得出每条光线与像平面之交点的具体坐标。若是光轴上的物点，则应以光轴与像平面之交点作为坐标原点，若是光轴外的物点，则应以主光线与像平面的交点作为坐标原点。

点列图中像点的弥散分布就代表了一物点结成影像时的光能量分布，故此计算时追迹的光线愈多，点列图上的像点就愈多，也就愈能精确反映物点所成影像的光能量分布状况。

点列图是设计阶段评价光学系统成像质量的一种简易方法。

对比二光学系统各自点列图中，物点所成影像的弥散形状、



a. 高分辨率、低明锐率　　b. 低分辨率、高明锐率

图 3—50　点列图与影像的分辨率及明锐度

最大弥散尺寸与能量分布状况，即可获知该二光学系统的相对成像质量特点。例如图 3—50，由 a 图所示可知，虽然有一部分像点的能量高度集中，这将使此光学系统在分辨高反差景物时具有很高的分辨率值，但该影像像点的弥散尺寸太大，这又将显著影响其所成影像的明锐度（其拍摄效果参见 b 图中所示）；由 c 图所示可知，虽然像点的能量尚未能高度集中，这将使此光学系统在分辨高反差景物时的分辨率值略低，但该影像像点的弥散尺寸很小，故必将显著提高其所成影像的明锐度（其拍摄效果参见 d

图中所示)。

五、调制传递函数与 MTF 曲线的评价

摄影者在拍摄中经常会发现下述现象：某摄影镜头在用分辨率检测法测量时，虽然分辨率很高，但用其拍摄普通景物时，所摄影像却显得不够清晰、轮廓不够鲜明、影调略灰暗、质感差；而另一摄影镜头在用分辨率检测法检测时，虽然分辨率并不很高，但用其拍摄普通景物时，所摄影像却显得比较清晰、轮廓鲜明、影调明朗、质感强。此外，用同一摄影镜头拍摄同一景物时，先后用硬光（即锐光）与柔光照明，则所摄影像的分辨率也将不同：前者因有强烈的阴影、反差高，故显得分辨率略高，而后者因阴影柔和、反差低，故显得分辨率略低。

图 3—51 为德国蔡司公司亥依那克纳（Erich·Heynacner）先生所摄，比较图 a 和图 b 可以发现：虽然摄影镜头 A 的分辨率远比摄影镜头 B 高（A 的分辨率是 B 的二倍），可镜头 A 所摄影像的轮廓并不鲜明、影调灰暗，好似在阴天拍摄的一样、灰蒙蒙一片，而图 b 中的影像却显得轮廓鲜明、影调明朗，影像似乎比图 a 还清晰。

总之，分辨率检测方法虽然意义明确、简便易行，能通过数值高低进行定量比较，在某种程度上不失为一种评价摄影镜头成像质量的良好方法，从而至今仍被广泛应用。但该方法又存在着明显不足，以至使摄影镜头分辨率的高低与所摄影像视觉效果的好坏之间，有时存在着矛盾和差异。

造成上述差异的根本原因如下：检测分辨率高低所依据的图案，系由排列在同一白色衬底上的深浅相同的黑线条所组成，亦即是由黑白分明的、高反差的消色线条组成；而普通摄影时所拍摄的自然界景物却比这复杂得多——被摄景物中不但有少量高反

a. 高分辨率低明锐度的镜头 A　　b. 低分辨率高明锐度的镜头 B

图 3—51

差的部位存在，而且还有各种中反差的部位存在，更有大量各种低反差（如黑与更黑、灰与更灰、白与更白、深红与更深红、淡绿与更淡绿等）的部位存在。总之，景物中的绝大部分是由亮度对比与色度对比微弱的、低反差的、且呈现为各种明暗阶调和浓淡色调对比的线条或纤微细部、层次所组成。显然，传统分辨率的检测图案与实际摄影时的拍摄对象，存在着明显差异。此外，通过所摄底片目视检测分辨率时，测量结果还受感光胶片性能、照明光源性质（如照明光源相干否）等因素的明显影响。这一切，必将影响传统分辨率检测法的精确性、全面性和客观性。

摄影镜头实现对高反差景物具有较好的分辨率，相对略易，

而实现对低反差景物具有较好的分辨能力则相对较难。人眼也如此（参见第一章第一节二中有关内容）。

其实，摄影镜头所摄影像的**视觉清晰度**，系由分辨率和明锐度两因素所共同决定的，亦即受分辨率高低和明锐度高低的综合影响和作用。

摄影镜头鲜明再现被摄景物中微弱亮度对比、细微明暗差别、低反差影纹之纤微细节和层次，以及微妙色调差异的能力，称为**明锐度**（Acutance）。

明锐度高的摄影镜头，可以清晰再现景物中黑与更黑、深灰与更深灰、浅灰与更浅灰、白与更白等细微的亮度阶调（即可使所拍摄的影像呈现出亮中有更亮、暗中有更暗的效果），以及鲜明再现景物中各种颜色在色别、饱和度、明度等诸多方面的微妙色调差异，使影像呈现出较细腻、丰富、自然、鲜明的影调、色调和纹理。因此当分辨率相同时，用高明锐度摄影镜头拍摄的影像轮廓鲜明、影纹明锐、影调明朗、质感强烈，低反差（即低对比度）部位的层次丰富、细腻，纹理纤细，从而使影像显得分外清晰，使电影正片显得很透亮。

图 3—52 所示为佳能（Canon）公司摄制的三张照片，照片中拍摄的是同一个女孩。图 a 系用高分辨率、低明锐度摄影镜头所摄，虽然照片上的头发明亮部位分辨率较好，但影纹细部不鲜明、不明锐、全部头发也显得较灰蒙蒙的，整个影像的影调和色调均显得平淡，以至使整个影像显得并不十分清晰。图 b 系用低分辨率、高明锐度镜头所摄，虽然照片中的影纹明锐、鲜明、反差好，影调明朗，但影像中损失了较多的纤微细节。图 c 系用同时具有相当高分辨率和明锐度的摄影镜头所摄，虽然影像的分辨率稍不如 a 图，明锐度也略逊 b 图，但整个影像的综合视觉效果最好：既有清晰、鲜明的细节，又有丰富的层次、影调和色调。

当用摄影镜头拍摄明暗（或黑白、浓淡）界限截然分明的线

a. 高分辨率　　b. 高明锐度　　c. 良好的平衡

图 3—52

条时（如图 3—53a 中所示线条，设该线条在明暗分界处的亮度分布如图 3—54a 中所示），因受摄影镜头残存像差和衍射现象的影响，被摄线条的明暗（黑白、浓淡）分界部位将会出现下述现象：明亮（如白色、淡色）区域与暗淡（如黑色、浓色）区域之间彼此相互扩散，以至使明暗（黑白、浓淡）临界处原本鲜明的影调、色调对比，变得柔和、模糊甚至呈现为灰蒙蒙的影调，使影像清晰度有所下降（见图 3—53b，线条明暗分界处的亮度分布如图 3—54b 所示）。若摄影镜头的成像质量略差，则上述扩散现象将会愈加严重，以至使影像清晰度显著降低（如图 3—53c 中所示，此时线条明暗分界处的亮度分布如图 3—54c 所示）。

我们可以把图 3—53a 中黑白线条的分界线视为由无数水平白“点”组成的一条极细的水平白“线”。摄影时由于摄影镜头存在像差的缘故，致使该极细的水平白“线”弥散为一较宽的朦胧的白“带”，如图 3—53b 与 c 中所示，从而使上述黑白线条的清晰度明显下降。

正因为在像平面上被摄物体中不同亮度区域的临界处，存在着明暗相互扩散的现象，所以当用某摄影镜头拍摄高反差的栅格

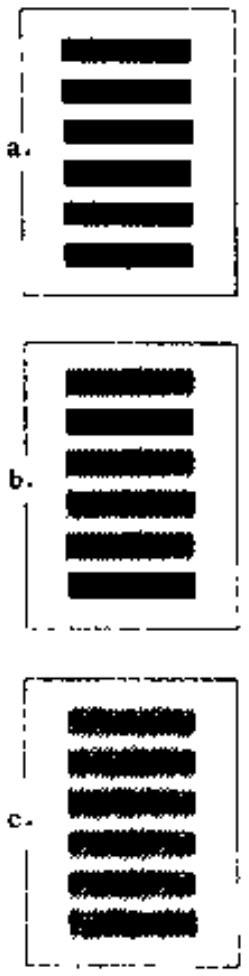


图 3—53

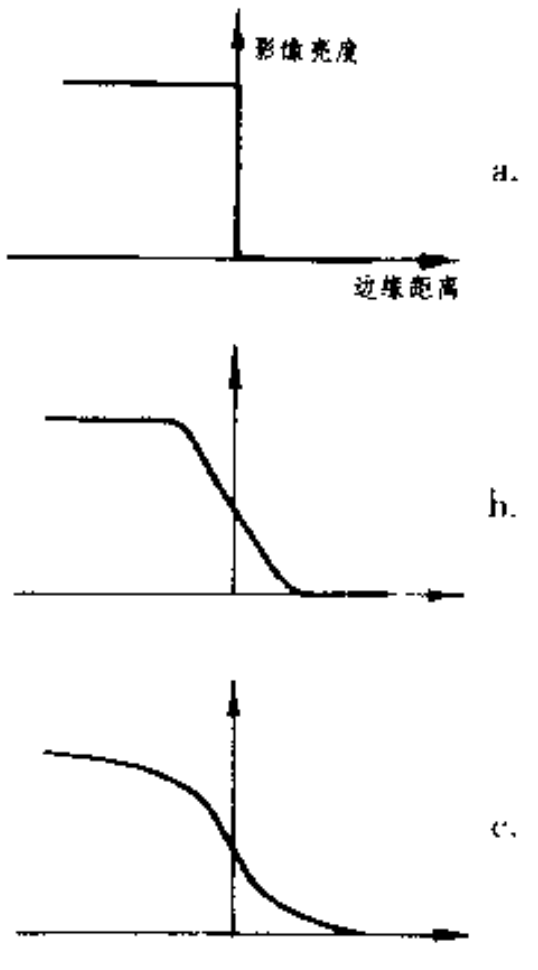


图 3—54

线条时，若其尚能对线条加以分辨，则用其拍摄低反差的同等间距的栅格线条时，明暗边缘界限的模糊、灰暗，必将使该镜头难于甚至无法分辨开线条了。

上述明暗区域相互扩散现象的弱与强，正是影响摄影镜头明锐度高低的根本原因。

如果分析不同明锐度摄影镜头拍摄同一点光源时，各自所结成的衍射光斑形状，可以发现以下规律：

由低明锐度摄影镜头所结成的衍射光斑，其中央亮斑的直径较小、且所集中的能量百分比并不太大，而中央亮斑的外围亮环较多、面积较大、较明亮、所占总能量的百分比也相当大。因而该镜头在拍摄高反差的黑白线条时，可能具有较高的分辨率；但当被摄相邻两像点相距较近时，彼此的诸光环将会出现较多的重

叠，且重叠部位又具有较强的合成亮度。故必将使所摄影像轮廓模糊、影纹暗钝、影调灰暗。

而由高明锐度摄影镜头拍摄同一点光源时，所结成的衍射光斑，其中央亮斑的直径虽较前者略大，但它集中了绝大部分光能，而中央亮斑的外围亮环较少、面积较小、较暗淡、所占总能量的百分比也相当小。因而用该镜头拍摄高反差的黑白线条时，虽其分辨率可能不如前者，但当被摄相邻两像点相距较近时，彼此互相重叠的光环较少、且重叠部位的总亮度很微弱。故该镜头所摄影像必将轮廓鲜明、影纹明锐、影调明朗。

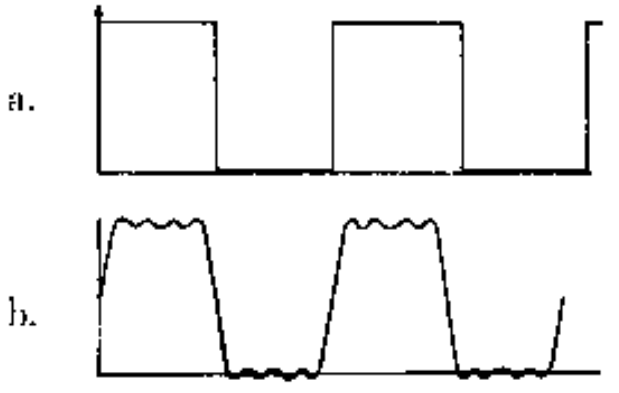
图 3—50 所示为考克斯（A·Cox）先生制作的照片，从照片中可以看出，当摄影镜头的明锐度不同时，其衍射光斑的点列图和所摄影像效果之间，将有明显区别。

近代光学理论认为，摄影镜头的成像过程，实质是一个信息传递过程——在摄影时，摄影镜头将景物本身的信息传递到感光胶片上，并存储起来。理想的摄影镜头和感光胶片，在上述信息传递过程中，应无失真现象。遗憾的是，目前的摄影镜头在信息传递过程中，均存在着或多或少的失真现象。

为了深入地研究上述信息传递过程，需先明确正弦光栅、空间频率、调制度、理想像等概念。

任何物体均可看作是各部位呈不同亮度分布的图形。由数学证明可知，呈亮度分布的任何图形均可分解为由一系列频率不同、振幅（即亮度）呈正弦变化的图形所组成（图 3—55b 中由 4 项正弦波叠加后的图形已非常接近图 3—55a 矩形波的形状了，若增加正弦波的项数，则完全可叠加成矩形波形状）。显然物体的亮度分布可视为由各种空间频率和振幅（亮度）之正弦波所组合而成，故可用正弦波图形代替各种图形和任何景物进行分析和研究。

典型**正弦光栅**的形状如图 3—56 所示。在该光栅上，亮度沿



3—55 正弦波模拟矩形波

空间方向（图中为左右长度方向）呈正弦分布，即由亮逐渐到暗、再逐渐到亮……。若用亮度和空间位置（长度）为坐标表示，则如图 3—57 中曲线 1 所示。

在正弦光栅中，相邻两亮度最大值（或最小值）间的距离 T，称为空间周期，单位为毫米。空间周期的倒数——单位长度（毫米）内的空间周期数，称为**空间频率**（Spatial Frequency）。空间频率等于每毫米内所包含之明、暗线条的“线对”数，单位是线对/毫米（Lp/mm、Linepairs/mm）。在上述正弦光栅中，空间频率由该光栅的一端向另一端逐渐增高。

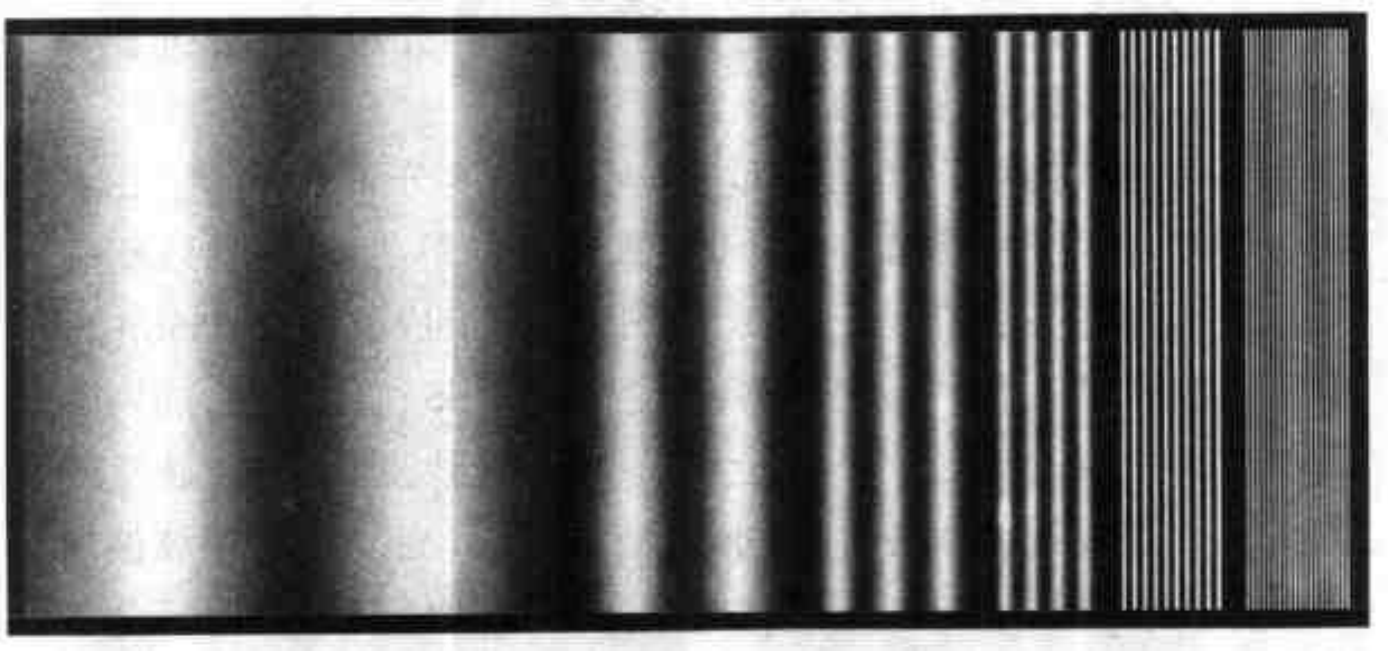


图 3—56 正弦光栅

调制度（modulation）又称对比度、反差、反衬度。

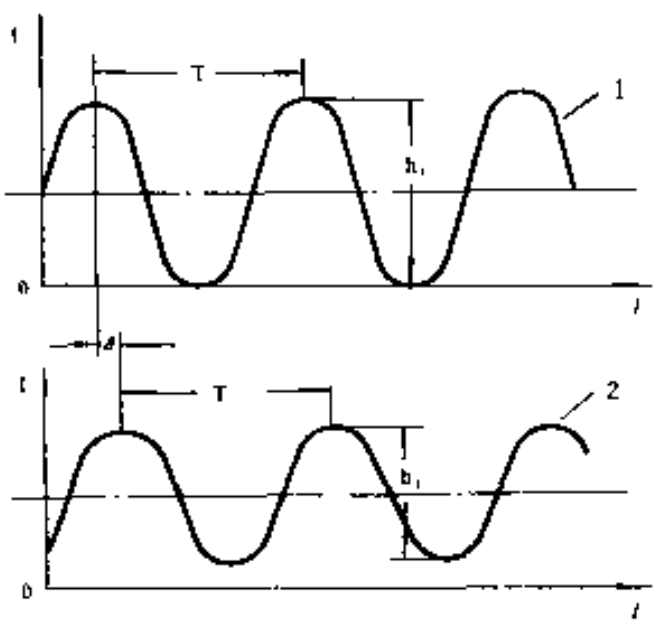


图 3—57　正弦光波曲线

某景物（或某影像）的**调制度**指该景物（或该影像）中最大亮度和最小亮度之差，与其最大、最小亮度之和的比值。

$$\text{调制度} = \frac{\text{最大亮度} - \text{最小亮度}}{\text{最大亮度} + \text{最小亮度}}$$

调制度决定着景物或影像的可分辨程度，人眼能否分辨出景物或影像的细节，与该细节本身的调制度大小紧密相关。例如，宇宙中的恒星离我们非常遥远，它们发出的光线穿过地球大气层后，变得非常微弱。在晴朗无月的夜晚，大气层与宇宙空间同样黑暗，因而上述微弱的星光与全黑的天空形成了一定的调制度，从而使人尚能分辨出星星；而当白天太阳把大气层照亮时，大气层的亮度远远大于恒星的微弱亮度，此时空中恒星位置的亮度，为微弱星光与明亮的大气层亮度之和，显然，恒星位置处与周围大气层的调制度近似为零，于是人眼再也无法分辨出天空中的繁星了。又如，白天在黑暗的室内观看电影、电视时，由于银幕或屏幕上的影像具有相当大的调制度，因而人眼感到影像很清晰。但若突然打开窗帘和门窗，让阳光进入室内，则将使整个银幕或

屏幕上的亮度普遍显著增高，从而使银幕或屏幕上的影像调制度明显降低，甚至使观众看不清电影和电视图像了。

光学系统在成像时，若影像的位置和形状均符合高斯光学（即该光学系统没有任何像差），且影像与物体的调制度相同（即像的亮度分布不考虑衍射、反射、吸收等损失），则该影像称为信息传递过程中的**理想像**。

光学系统成像时，存在着由垂轴放大率 m 引起的像与物之间的空间频率差异。为便于研究，下面只比较该光学系统的理想像与实际像间的差异，并认为理想像的调制度即等于被摄景物的调制度，并用 M 标示。

理想像之调制度 M 的计算公式为

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{3—24}$$

式中 I_{max} 为理想像的最大亮度

I_{min} 为理想像的最小亮度。

由计算可知

$$0 \leqslant M \leqslant 1 \tag{3—25}$$

在实际成像时，由于光学系统残存着像差、杂光并有衍射等，故实际像的调制度必将比理想像的调制度降低，实际像之调制度 M′的计算公式为

$$M' = \frac{I'_{max} - I'_{min}}{I'_{max} + I'_{min}} \tag{3—26}$$

式中 I'_{max} 为实际像的最大亮度

I'_{min} 为实际像的最小亮度。

由计算可知

$$0 \leqslant M' \leqslant 1 \tag{3—27}$$

此外，实际像的位置也相对理想像沿空间方向平移了一段距离，即两影像间有了位相差异。参见图 3—57 所示。图中曲线 1

为正弦光栅所成的理想像，曲线 2 为实际像。显然，曲线 2 不但振幅（调制度）降低了，而且还沿 X 轴方向有了相移。比较两曲线可知，实际像的光能并未损失，只是光的分布重新进行了排列而已——影像暗部的亮度升高，亮部的亮度降低了。

光学系统传递的是亮度沿空间分布的信息。光学系统在传递被摄景物信息时，被传递之各空间频率的正弦波信号，其调制度和位相在成实际像时的变化，均为空间频率的函数，此函数称为**光学传递函数 OTF**（Optical Transfer Function）。

光学传递函数是分析与研究信息传递过程中，失真大小的最佳方法，因而是目前光学领域中评价摄影镜头成像质量优劣的最科学、最精确、最全面、最完善、最客观的方法。也只有通过光学传递函数才使分辨率与明锐度之间建立起了有机联系，并反映出二者对所成影像的综合影响与作用。但此法较摄影分辨率法略繁琐，并需通过昂贵的光学传递函数测量仪进行测量与绘图。

OTF 一般由调制传递函数 MTF（Modulation Transfer Function）与位相传递函数 PTF（Phase Transfer Function）两部分组成。

调制传递函数 MTF 是实际像与理想像之间调制度之比相对空间频率的函数。它可清晰地表示出摄影镜头以怎样的调制度，传递某一空间频率。

摄影镜头把景物的调制度信息，传递到像平面处，变为实际影像的调制度信息，在此传递过程中，该摄影镜头的调制传递函数值为

$$\text{MTF 值} = \frac{M'}{M} \tag{3—28}$$

式中 M′为实际影像的调制度

M 为理想像的调制度。

在摄影镜头成像时，由于像差、杂光和衍射等的影响，实际影像的最大亮度一般小于或等于理想像（即景物）的最大亮度，

而实际像的最小亮度却大于或等于理想像（景物）的最小亮度。

即 $$I_{max} \geqslant I'_{max}$$

$$I_{min} \leqslant I'_{min}$$

显然，实际影像的调制度--般小于或等于理想像（即景物）的调制度。

即 $$M \geqslant M'$$

因此调制传递函数值--般在 1 至 0 之间变化：

$$1 \geqslant \text{MTF 值} \geqslant 0 \qquad (3—29)$$

显然，摄影镜头在景物信息的传递过程中，一般存在着明显的失真现象。

用不同摄影镜头在相同情况下，对同一空间频率的景物成像时，由于各镜头对像差校正的程度不同，因而不同镜头的 MTF 值的大小--般并不相同。对镜头像差校正得愈好者，则其 MTF 值愈高。反之 MTF 值愈低，则说明该摄影镜头在信息传递过程中的失真将愈大，景物中陡直的矩形波将变为平缓的正弦波，且振幅明显减小。

设被摄物体为某空间频率之黑白相间的线对，其亮度分布呈矩形波（如图 3—58a 中所示）。若设该物体中白、黑线条的各白亮度分别为 100 与 0，则该被摄景物的调制度为

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{100 - 0}{100 + 0} = 1$$

用某高品质专业摄影镜头拍摄此亮度分布呈矩形波的黑白线对时，由于受该摄影镜头残存之较小像差的影响，所成影像的亮度分布将变为图 3—58b 中所示的正弦波，显然影像的明锐度略有下降。

而用某中等质量的摄影镜头拍摄上述同一黑白线对时，由于受所用摄影镜头之略大像差的影响，所成影像的亮度分布将变为图 3—58c 中所示的正弦波，显然影像的明锐度较前有较明显的

下降。若设该所摄影像中白、黑线条的各自具体亮度分别为 90 与 10，则该影像的调制度为

$$M' = \frac{I_{max}' - I_{min}'}{I_{max}' + I_{min}'} = \frac{90 - 10}{90 + 10} = 0.80$$

用某普及型摄影镜头拍摄上述同一黑白线对时，由于受所用摄影镜头之较大像差的影响，所成影像的亮度分布将变为图 3—58d 中所示的正弦波，显然影像的明锐度又进一步显著下降了。若设该所摄影像中白、黑线条的各自具体亮度分别为 70 与 30，则该影像的调制度为

$$M' = \frac{I_{max}' - I_{min}'}{I_{max}' + I_{min}'} = \frac{70 - 30}{70 + 30} = 0.40$$

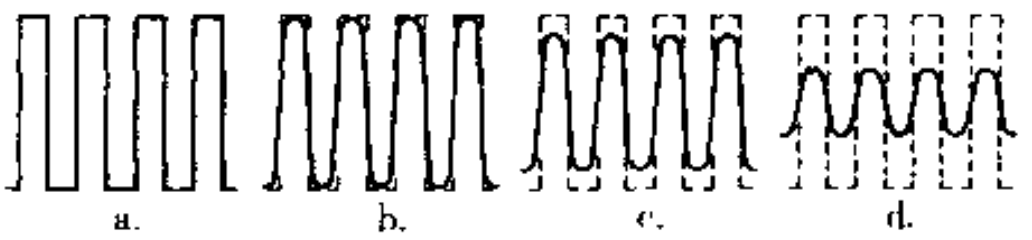


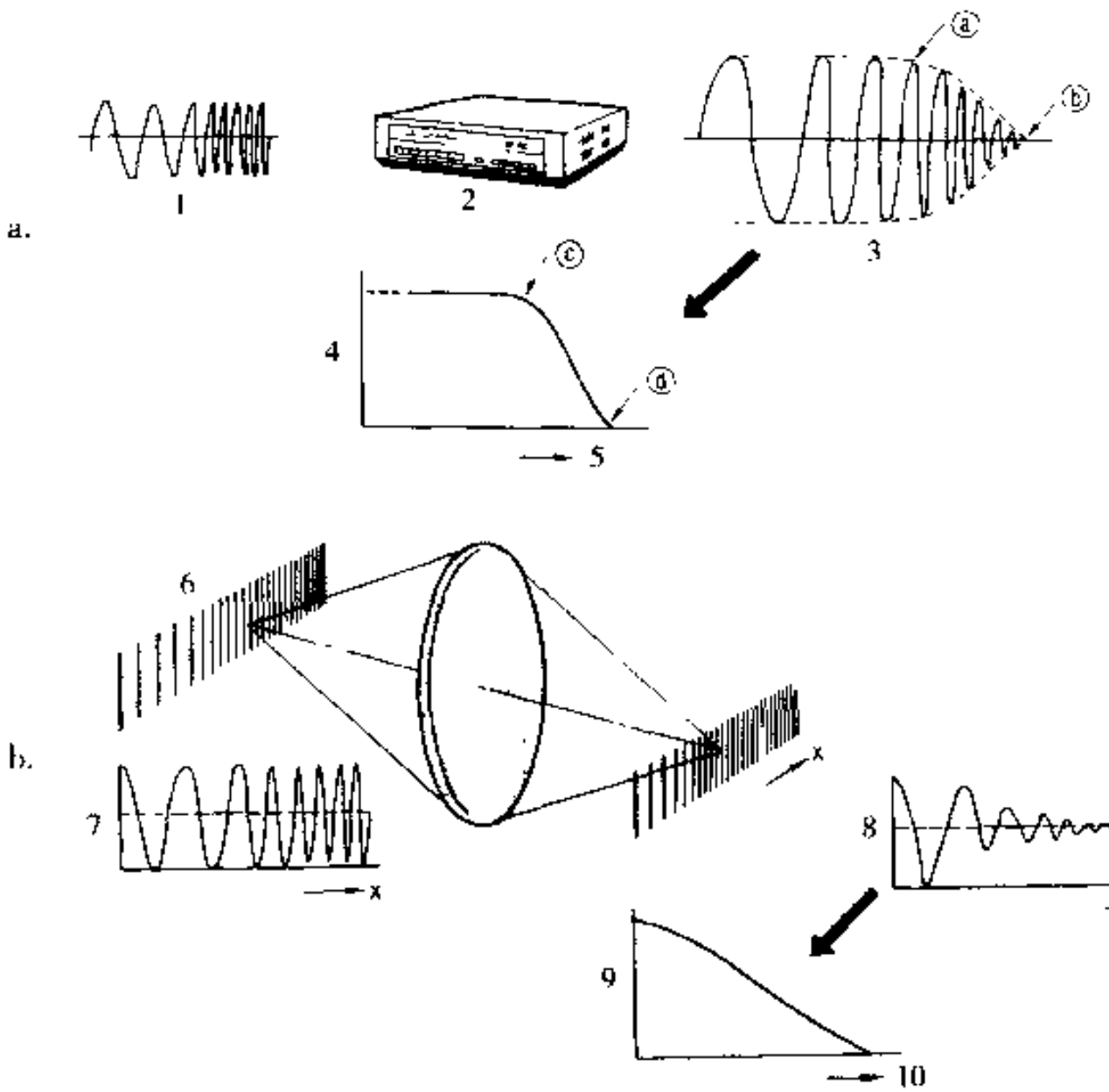
图 3—58

在相同条件下，所成影像调制度 M'较小的摄影镜头，其在成像时的信息损失较大，所成影像的清晰度一般相对较低。

同一摄影镜头的 MTF 值随着景物的空间频率不同而变化——MTF 是景物空间频率的函数，其中空间频率愈高，MTF 值相对愈低。这表示摄影镜头在成像时，景物细部层次的损失远较其宏观部位（粗部）层次的损失为大。

其实扩音机在声音信息的传递工作过程中，也同样存在着明显失真现象，并且同样是高频损失大于低频损失的。参见图 3—59 中所示。

MTF 好的摄影镜头对低对比度景物的再现非常有利，其所摄影像必将是层次丰富、细节鲜明、质感细腻的。



1. 等振幅变频正弦波　2. 放大器　3. 放大后的波形（高频明显衰减）
4. 振幅　5. 频率　6. 正弦光栅　7. 正弦光栅所对应的亮率曲线
8. 正弦光栅经摄影镜头成像后的亮度曲线　9. MTF　10. 空间频率

图 3—59　扩音机与摄影镜头在信息传递过程中的失真

利用 MTF 评价成像质量，可排除人眼观测时主观误差因素的影响，以及感光胶片等客观因素的影响，因而精度高。

位相传递函数 PTF，是实际像与理想像之间的位相之差，相对空间频率的函数。

由于 PTF 一般对成像质量影响较小，此外，目前测量 PTF 的

仪器较少，计量精度也不如 MTF 高，所以目前研究摄影镜头成像质量时，通常忽略 PTF 的影响。

因为 MTF 能反映除畸变外的所有其它像差，且 MTF 反映的情况与实际成像结果非常吻合，因此在研究摄影镜头成像质量时，通常仅重点检测其 MTF 曲线。

MTF 与 PTF 的典型曲线如图 3—60 所示。理想像的 MTF 曲线形状，是一条 MTF 值为 1 的水平直线，即在各种空间频率处 MTF 值均为 1。理想像的 PTF 曲线形状，是一条 PTF 值为 0 的水平直线，即在各种空间频率处 PTF 值均为零。由图 3—60 可知，摄影镜头在传递信息的过程中，高频部位的损失要远比低频部位的损失大些，这将导致所摄影像的细部明锐度出现较大的损失。

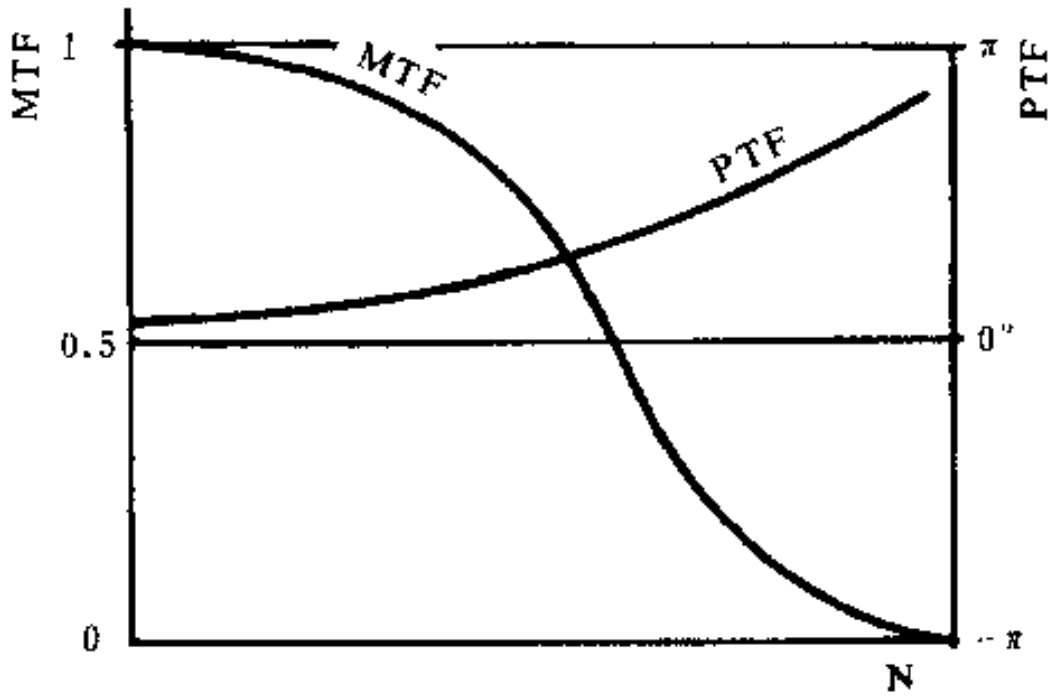


图 3—60　MTF 和 PTF 的典型曲线形状

当 MTF 曲线降为零时所对应的空间频率，即 MTF 曲线与横坐标轴的交点，称为该光学系统的截止空间频率。显然，被摄景物中所有高于此截止空间频率的信息均将无法通过此光学系统。故此可以把光学系统视作一低通线性滤波器。

在其它条件相同的情况下，测试同一光学系统的 MTF 值时可以发现，由子午光束成像时的 MTF 值与由弧矢光束成像时的 MTF 值，往往并不相等，因而可获得一对 MTF 曲线。其中弧矢光束成像时的 MTF 曲线，称为**弧矢或径向** MTF 曲线，标示为 S 或 R（Sagittal、Radial）曲线，S 曲线反映的是该光学系统分辨与径线平行的一组线条时的分辨能力高低；子午光束成像时的 MTF 曲线，称为**子午或切向** MTF 曲线，标示为 M 或 T（Meridional、Tangential）曲线，M 曲线反映的是该光学系统分辨与直径垂直的一组线条时的分辨能力高低。参见图 3—44 所示。

当测试条件均相同时，在画幅中心处所测得的弧矢 MTF 值与子午 MTF 值一般将完全相等，这表明在画幅中心处，弧矢 MTF 曲线与子午 MTF 曲线将彼此相交而重合为一点。

实际上，除摄影镜头成像质量外，影响像场中任意一像点处之 MTF 数值具体大小的因素主要有下列六种：

1. 空间频率的高低；

2. 所检测像点在像场上的具体方位——是在画幅中心还是靠近画幅边缘，亦即被检测像点的具体像角 $2\omega'$ 的大小，或其像点的具体相对位置（指该像点距像场中心之间距离的具体远近，用 U 表示，或指该像点距像场中心的距离 U 与最大像场半径 U_{max} 之比的具体大小——**像场半径比**，用 $U/U_{max} \times 100\%$ 表示）；

3. 所检测之光束的性质——检测的是子午光束还是弧矢光束；

4. 所检测之光波的具体波长——是白光还是色光；

5. 检测时光圈的具体大小；

6. 检测时调焦距离的具体远近，即检测时所成影像放大率的具体大小。

显然，为了全面反映一只摄影镜头成像质量，需要通过一系列 MTF 曲线加以表示。这远比图 3—60 所示的典型 MTF 曲线要复杂得多。

典型 MTF 曲线的纵坐标为 MTF 值，横坐标为空间频率 N（单位为线对/毫米即 Lp/mm）。

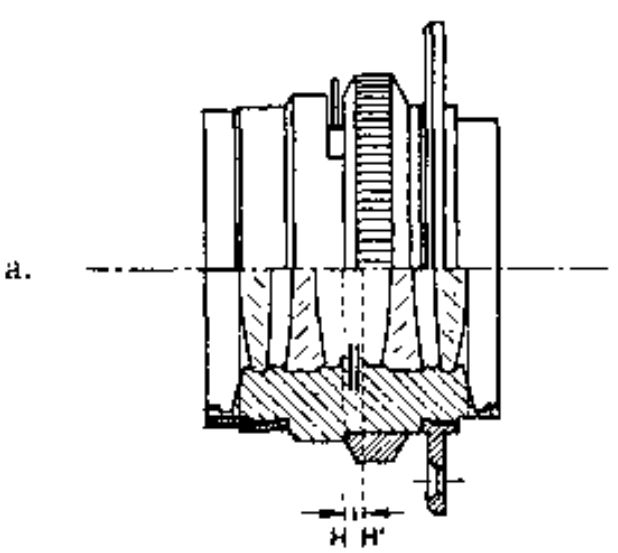
为了简化对摄影镜头之 MTF 曲线的检测工作量，一般光学公司或者仅检测几个特定空间频率下的 MTF 曲线（此时横坐标为最大像场半径 U_{max} 或像场半径比 $U/U_{max} \times 100\%$ 或视场角 $2\omega'$），或者仅检测几个特定视场角下的 MTF 曲线（此时横坐标为空间频率）。

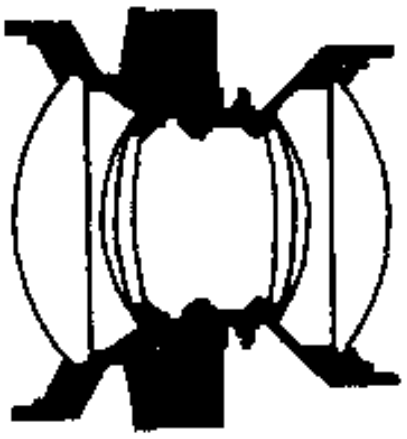
譬如，仅检测 0°视场角、0.5 带视场角 0.707 带视场角、0.85 带视场角，四个视场角下的 MTF 曲线。此时，需先后在某一视场角处之像点上，针对各个空间频率，逐一检测其各自的 MTF 数值大小。具体 MTF 曲线形状参见图 3—62 中所示（图中无 0.5 带视场角的 MTF 曲线）。

又如，大型散页片照相机用摄影镜头，通常仅检测空间频率为 5 与 10、20 线对/毫米的三个空间频率下的 MTF 曲线；120 照相机用摄影镜头，通常仅检测空间频率为 10 与 20、40 线对/毫米的三个空间频率下的 MTF 曲线；而 135 照相机通常仅检测空间频率为 10 与 30 线对/毫米的二个空间频率下的 MTF 曲线。此时，需自像场中心沿着像场半径方向，针对各个像点，逐一检测其各自的 MTF 数值大小。具体 MTF 曲线形状参见图 3—63 中所示。

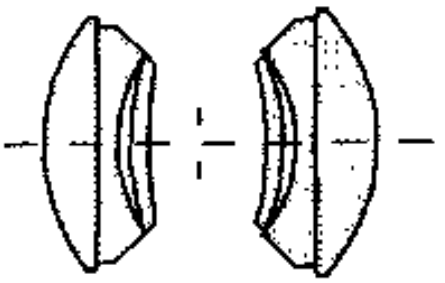
图 3—62 所示 4 幅图均为德国产罗敦司特（Rodenstock）牌阿波·罗那（Apo－Ronar）、150 毫米、F9 摄影镜头（其光学结构见图 3—61a 所示）的 MTF 曲线。4 幅图中的横坐标均为空间频率，单位为线对/毫米，纵坐标皆为 MTF 值（由 0 至 1）。各图中的黑实线状曲线均为弧矢 MTF 曲线，黑虚线状曲线皆为子午 MTF 曲线。各图中的 W = 0°曲线，表示在 0°像场角处（即光轴上）测试的 MTF 曲线；20.5°曲线表示在 20.5°像场角处测试的 MTF 曲线；24°曲线表示在 24°像场角处测试的 MTF 曲线。4 幅图

均在光圈数为 F22、影像放大率为 $m = 1$ 条件下测试的。此外，图 a 为白光成像时的 MTF 曲线，图 b、图 c、图 d 分别为加品红、青、黄滤光镜成像时的 MTF 曲线。显然，同一摄影镜头在同一光圈数和同一影像放大率下摄影时，不同像场角处及不同色光下的 MTF 曲线一般不相同。





b.



c.

图 3—61

图 3—63 所示 2 幅图均为罗敦司特牌西罗那（SIRONAR）N 型 150 毫米、F5.6 摄影镜头（其光学结构见图 3—61b 中所示）的 MTF 曲线。2 图中横坐标均为被测点所在位置相对像场中心（光轴）而言的像场直径值，单位为毫米；该横坐标同时又为自像场中心向像场边缘度量时的各点像场角值（指 $2\omega'$）；纵坐标

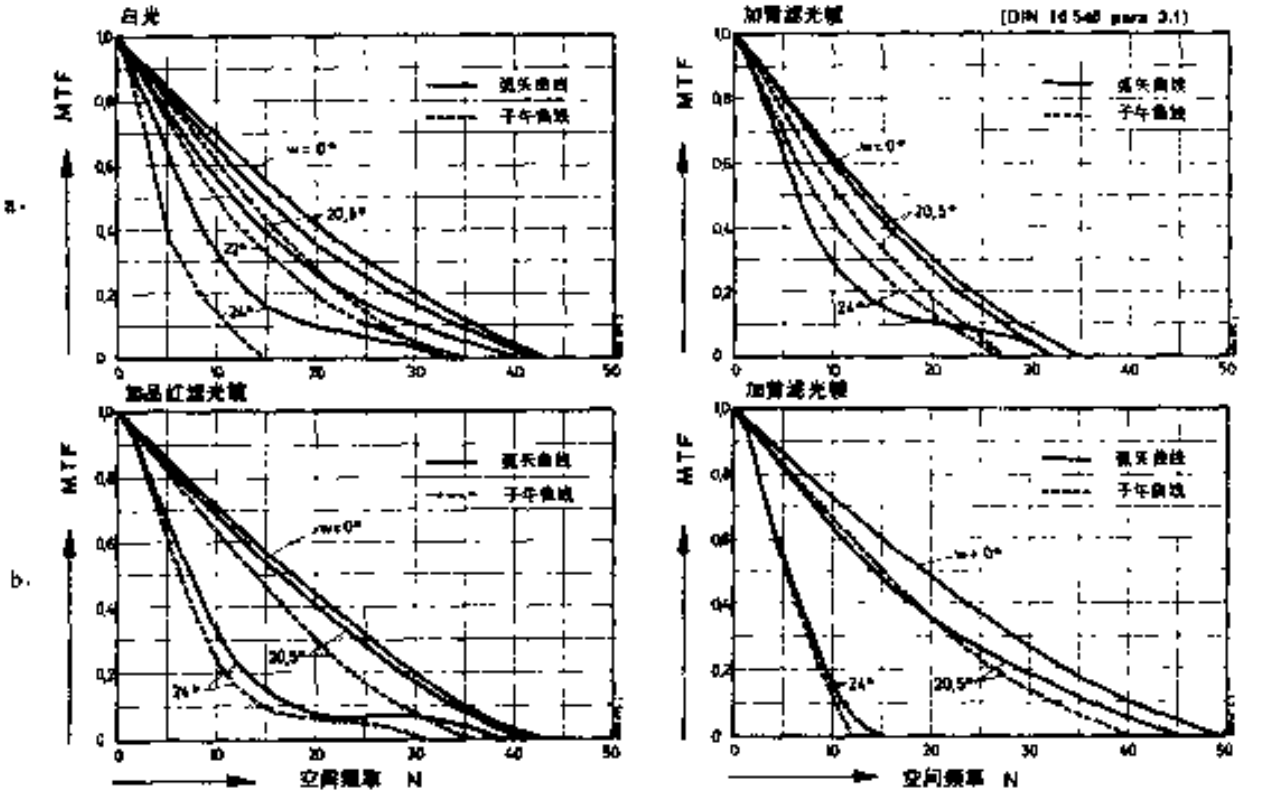
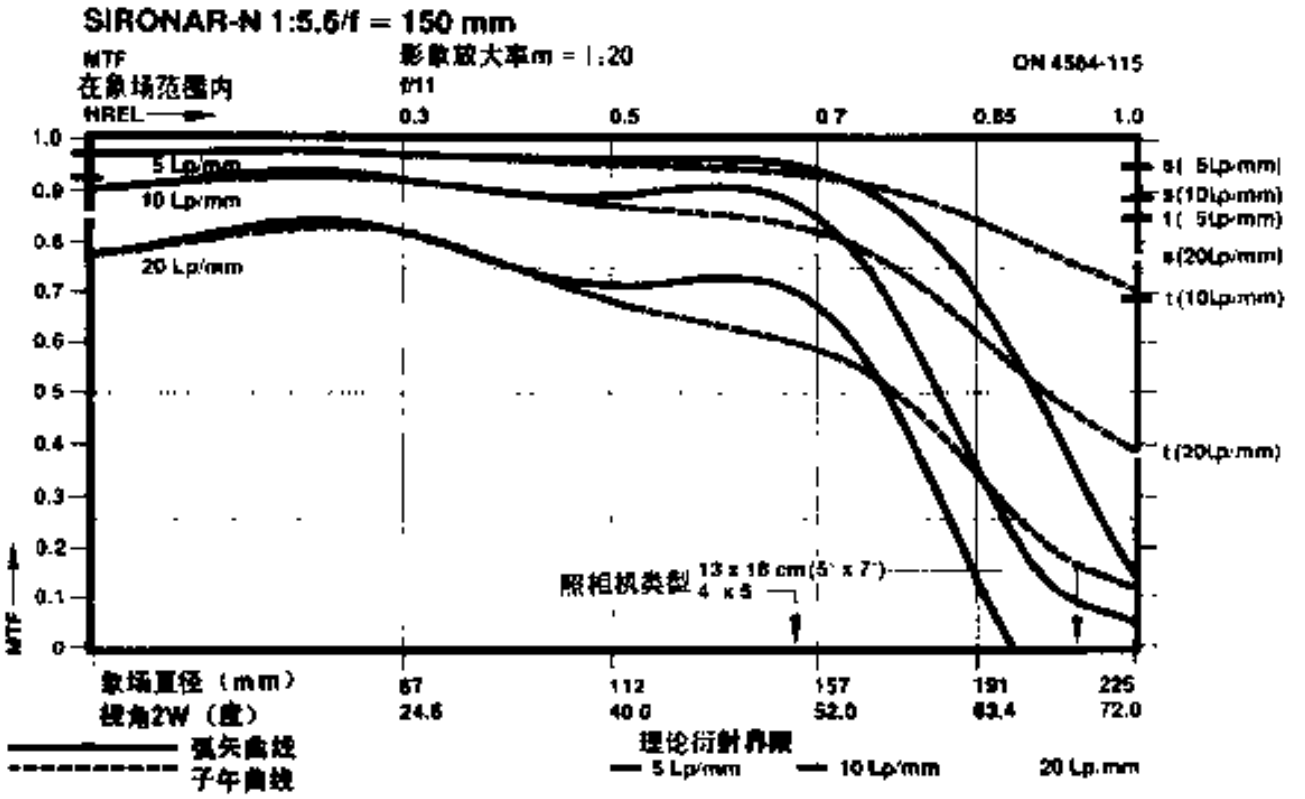


图 3—62　罗敦司特牌阿波·罗那 150 毫米、F9 摄影镜头的 MTF 曲线

均为 MTF 值（由 0 至 1）。各图中的黑实线状曲线皆为弧矢 MTF 曲线，黑虚线状曲线均为子午 MTF 曲线。各图中自上而下，第一对、第二对、第三对曲线分别是空间频率为 5 线对/毫米、10 线对/毫米、20 线对/毫米时，各自对应的 MTF 值随像场位置而变化的曲线。上述图 a 是在 F11、影像放大率为 $m = 1:20$ 条件下测试的，图 b 是在 F22、影像放大率为 $m = 1:20$ 条件下测试的。显然，同一摄影镜头在同一影像放大率下，不同光圈数及不同空间频率下的 MTF 曲线并不相同。一般随着光圈数值的增大，光轴上即像场中心处的 MTF 曲线将有所下降，而像场边缘处的 MTF 曲线将有所改善。

图 3—64 所示 6 幅图均为德国产施耐德（Schneider）西玛（SYMMAR）S 型 120 毫米、F5.6 摄影镜头（其光学结构见图 3—61c 中所示）的 MTF 曲线。6 幅图中的横坐标均为像场半径比 U/

a.



b.

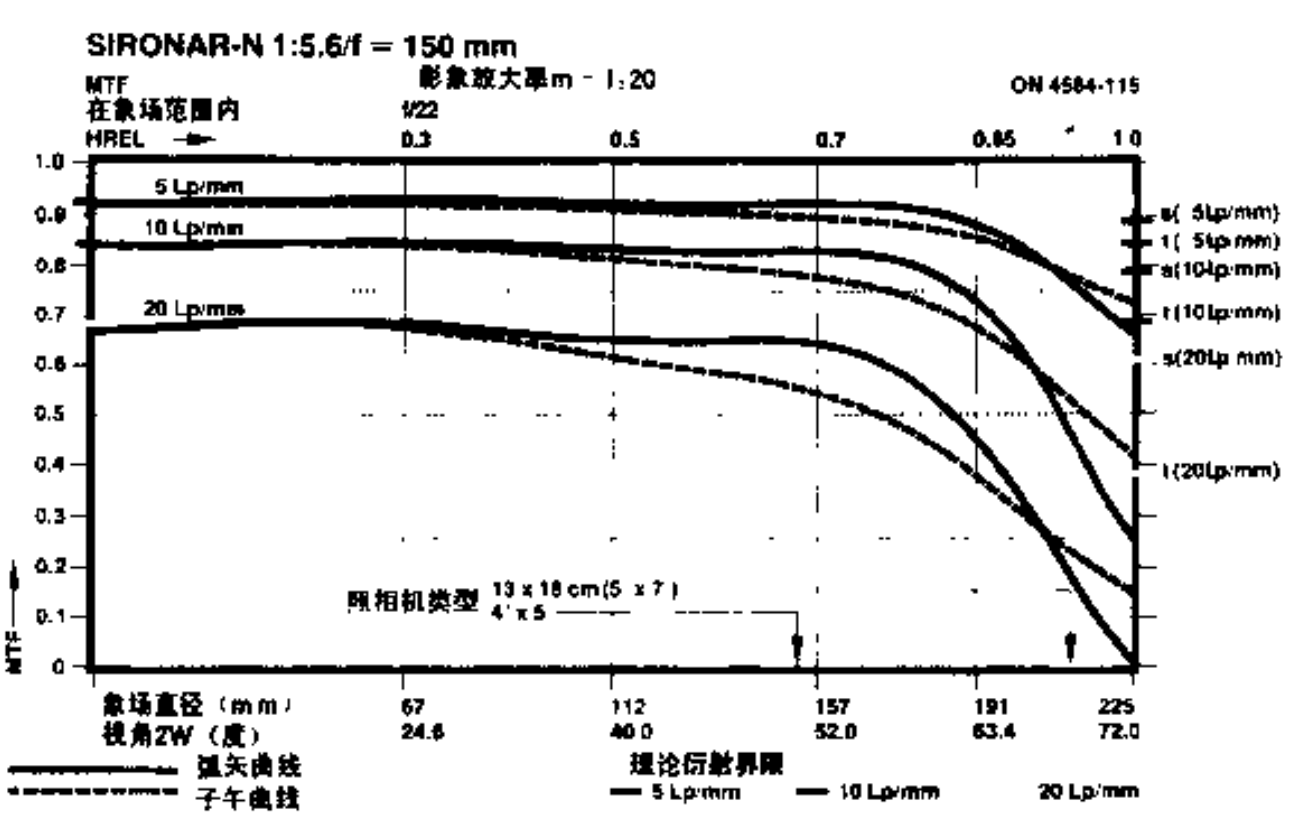


图 3—63 罗敦司特牌西罗那 N 型 150 毫米、F5.6 摄影镜头的 MTF 曲线

$U_{max} \times 100\%$（U_{max}为摄影镜头的最大像场半径 86.5 毫米，U 为测

试点处的实际像场半径)；纵坐标均为 MTF 值（由 0% 至 100%）。各图中的黑实线状曲线均为弧矢 MTF 曲线，黑虚线状曲线皆为子午 MTF 曲线。各图中自上而下第一对、第二对、第三对曲线，分别是空间频率为 5 线对/毫米、10 线对/毫米、20 线对/毫米时，各自对应的 MTF 值随像场半径比而变化的曲线。左侧三图和右侧三图，自上至下分别是在影像放大率为 1∶∞、1∶10、1∶5 条件下测试的。左侧三图测试时光圈数为 F5.6，右侧三图测试时的光圈数为 F22。比较同侧三图可知：同一摄影镜头在光圈数、空间频率、像场位置等条件均相同时，不同影像放大率（即不同调焦距离处）的 MTF 曲线一般并不相同。比较左右两侧的图可知：同一摄影镜头在空间频率、像场位置、影像放大率、调焦距离等条件均相同时，不同光圈数下的 MTF 曲线一般也不相同。

综上所述可知，同一只摄影镜头在不同测试条件下所测得之 MTF 曲线的形状一般各不相同。故此，在对比不同摄影镜头的 MTF 曲线时，只有针对性质相同的同类 MTF 曲线进行比较才有意义。

首先，同一摄影镜头在不同光线下，所测得之 MTF 曲线的形状一般不同。譬如，同一只摄影镜头先后在白光下测得的 MTF 曲线与在色光下测得的 MTF 曲线的形状一般不同，并且该只镜头在不同色光下测得的 MTF 曲线形状一般也各不相同（参见图 3—62 中所示）。故此摄影者比较两只供普通用途的摄影镜头时，应选择均在同一白光条件下各自所测得的相应那对 MTF 曲线进行对比。

其次，同一摄影镜头在不同光圈数下，所测得之 MTF 曲线的形状一般不同。故此摄影者应选择两只镜头在相同光圈数下，所测得的相应那对 MTF 曲线进行对比。

再次，同一摄影镜头在不同调焦距离（或不同影像放大率）

下，所测得的 MTF 曲线形状一般不同。故此摄影者应选择两只镜头在相同调焦距离（或相同影像放大率）下所测得的相应那对 MTF 曲线进行对比。

又次，同一摄影镜头在不同空间频率（此时横坐标为像场半径或像场半径比）或在不同视场角（此时横坐标为空间频率）下，所测得之 MTF 曲线的形状一般不同。故此应选择两只摄影镜头各自在相同空间频率或相同视场角下，所测得的相应那对 MTF 曲线进行对比。

最后，同一摄影镜头针对不同性质光束所测得之 MTF 曲线的形状一般不同。故此应选择相同性质的 MTF 曲线进行对比，即子午光束 MTF 曲线与子午光束 MTF 曲线相比、弧矢光束 MTF 曲线与弧矢光束 MTF 曲线相比。

总之，摄影者欲通过对不同摄影镜头各自之 MTF 曲线的比较，判断两只镜头孰优孰劣时，必须遵循下列 **MTF 曲线评价原则**：

1. 应该针对这两只镜头的同类 MTF 曲线进行对比——仅比较在同类条件之下所测得的性质相同的那一对相应 MTF 曲线。例如应选择两只镜头同在白光下，且在同光圈数、同调焦距离（或相同影像放大率）、同空间频率（或同视场角）下，所测得的那一对同性质光束（均为子午光束或均为弧矢光束）的相应 MTF 曲线，然后进行对比。

例如，不宜对比两只摄影镜头一只在 F2 光圈下、一只在 F2.8 光圈下所测得的两条 MTF 曲线。这是由于同一只摄影镜头，在 F2 下测得的那条 MTF 曲线与在 F2.8 下测得的那条 MTF 曲线相比，一般后者的成像质量要略好。

也不宜对比两只摄影镜头一只针对无限远 ∞ 调焦、一只针对有限远距离调焦所测得的两条 MTF 曲线。因为同一只摄影镜头，针对无限远调焦时所测得的那条 MTF 曲线形状，一般要比针对

最近距离处调焦时所测得的那条 MTF 曲线略好些。

更不宜对比两只摄影镜头一只空间频率为 10 线对/毫米，一只为 30 线对/毫米的两条 MTF 曲线。因为同一只摄影镜头，针对较小空间频率（如空间频率 10 线对/毫米）条件下所测得的那条 MTF 曲线形状，肯定比针对较大空间频率（如 30 线对/毫米）条件下所测得的 MTF 曲线的形状好。甚至供 135 照相机用的某些低挡摄影镜头，在 10 线对/毫米条件下所测得的 MTF 曲线的形状，比一些专业摄影镜头在 30 线对/毫米条件下所测得的 MTF 曲线的形状还好。作为负责的光学公司，一般同时提供 135 照相机用摄影镜头，在空间频率 10 线对/毫米与 30 线对/毫米的两条 MTF 曲线。而作为需放大后观赏照片的 135 照相机而言，空间频率为 30 线对/毫米那条 MTF 曲线的状况，比 10 线对/毫米的那条 MTF 曲线更有意义。

但是日本有一家照相机公司，在我国国内刊登 135 照相机用摄影镜头广告时，只绘出空间频率为 10 线对/毫米的那一对 MTF 曲线，大力宣传，根本不刊登曲线形状远为较差的 30 线对/毫米的那一对 MTF 曲线——有意回避，这对许多不清楚 30 线对/毫米的那一对 MTF 曲线状况对使用 135 相机摄影非常重要，以及 10 线对/毫米的 MTF 曲线形状，远比 30 线对/毫米的 MTF 曲线形状要好得多的摄影者，似乎有误导之嫌。

2. 分析 MTF 曲线时，应同时分析弧矢 MTF 曲线与子午 MTF 曲线的形状，而不应仅仅分析其中的一条。尤其应分析每只摄影镜头各自之弧矢 MTF 曲线与子午 MTF 曲线之间的形状差异状况：其中哪只摄影镜头的弧矢 MTF 曲线与子午 MTF 曲线的曲线形状差异较小，且曲线形状同时相对较好者，其成像质量相对较优。而若某摄影镜头之弧矢 MTF 曲线与子午 MTF 曲线的形状差异较大——其中的一条很好而另一条却很差时，则说明该摄影镜头对弧矢光束与子午光束成像时的成像性能彼此不均衡（这表示该摄

影镜头尚残存着较大的像散等像差的缘故），这必将明显影响该摄影镜头的总成像质量。其中，弧矢 MTF 曲线较好，而子午 MTF 曲线沿横坐标轴衰减远较迅速者，表示该摄影镜头对“与像场半径相平行之线条”成像时的清晰度虽较好——径向分辨度较好，但对“与像场半径相垂直之线条”成像时的清晰度较差——切向分辨率较差；反之，若仅弧矢 MTF 曲线沿横坐标轴衰减迅速，则表示该摄影镜头的径向分辨率较差，而切向分辨度较好。

有的人为日本厂家写宣传文章时，大力宣扬某摄影镜头的弧矢 MTF 曲线如何如何好，而有意回避子午 MTF 曲线比较差的事实，这不是一个公允的评价态度。

为了全面反映一只摄影镜头的综合性能，厂家对一只摄影镜头一般同时提供若干条 MTF 曲线以供摄影者参考、比较。参见图 3—62、63、64 三图中所示。对于为普通摄影用途而设计的摄影镜头，厂家在一般情况下，仅提供在白光之下所测试的 MTF 曲线。

厂家针对一只摄影镜头一般同时提供该镜头在下列条件下的一系列 MTF 曲线：在不同光圈数下（如最大光圈与中等光圈），以及在不同影像放大率（如 1∶∞与 1∶20 甚至 1∶10、1∶5）或不同调焦距离下（如无限远与中等距离、最近距离），在不同空间频率（如 120 照相机常为 10 与 20、40 线对/毫米，135 照相机常为 10 与 30 线对/毫米）或不同视场角（如 0°视场角、0.707 带视场角、最大视场角）下，先后针对子午光束及弧矢光束这两种不同性质光束，各自所测得的 MTF 曲线。

调制传递函数的测定需借助专用测试仪器进行。其简单原理如下：用被测光学系统对光源照明下的正弦光栅板成像，同时用狭窄的隙缝在像平面上扫描，并用光电倍增管接受透过隙缝的光能，从而测出像的调制度，并绘出相应的 MTF 曲线。

人眼在观察景物（或影像）时，当该景物（或影像）的调制

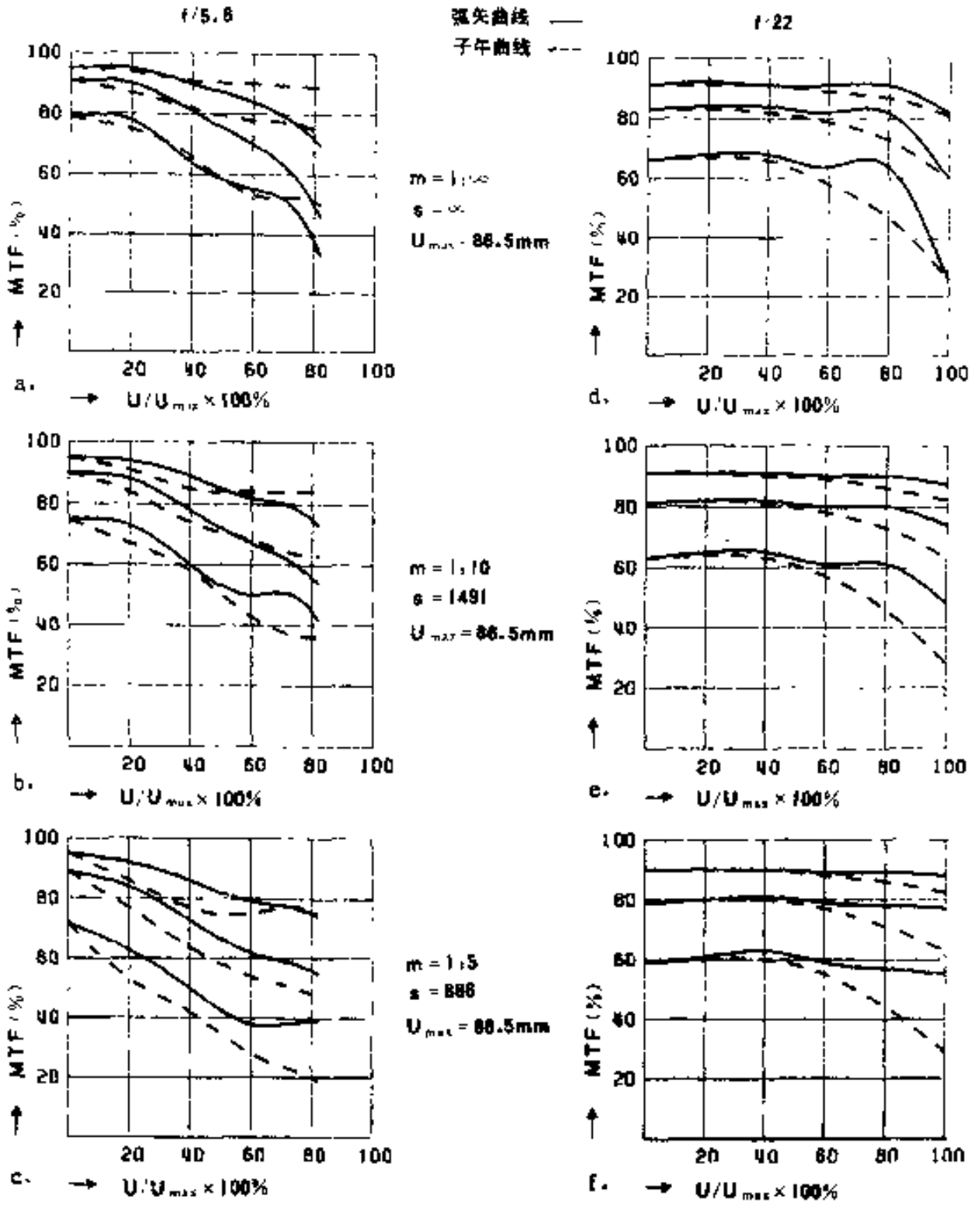


图 3—64　施耐德牌西玛 S 型 120 毫米
F5.6 摄影镜头的 MTF 曲线

度降至 0.05（即 5%）时，尚能被人眼察觉；当降至 0.02（即 2%）时，则需仔细观察后才可察觉；调制度再低时，人眼就无法察觉了。由于测试分辨率的图案一般为黑白分明的高对比度

（高反差）之线条，即测试该分辨率图案时景物的调制度 M 为 1，若设定影像的调制度 M′降至 0.05 时为可分辨开的标准，则此时的 MTF 值为

$$MTF = M'/M$$
$$= 0.05/1 = 0.05$$

故此，光学界一般规定某摄影镜头的 MTF 曲线上，当 MTF 值降至 0.05 时所对应的那一空间频率，称为该摄影镜头对高反差分辨率图案的具体分辨率值（也有人认为 MTF 值降至 0.03 时所对应的那一空间频率为摄影镜头的分辨率值）。

根据摄影镜头的 MTF 曲线，可以很迅速地判断出该镜头对不同调制度的分辨率标板观测时，所具有的实际分辨率值。例如，用某镜头对调制度先后为 1、0.5、0.1 的分辨率图案观察时，则该镜头的最大分辨率分别为 MTF 值等于 0.05、0.10、0.5 时，MTF 曲线所对应的空间频率。

根据调制传递函数分析摄影镜头成像质量优劣时，常采用下列 **MTF 曲线评价方法：**

1. 根据空间频率增大时，MTF 曲线自像场中心（或 0 空间频率）处沿横坐标下降的缓、陡程度评价成像质量：随着像点逐渐远离像场中心（或随着空间频率的增大），MTF 值下降愈缓慢的镜头，对低调制度、中调制度和略高调制度信息的传递能力相对愈强、明锐度高，因而所摄影像的层次丰富、影调细腻、质感强。反之，MTF 值随着横坐标（如：空间频率）的增大而下降迅速者，则其成像质量较差。因此在信息传递过程中，连续空间频率所对应的振幅衰减率愈小愈好。

2. 在摄影时的常见空间频率范围内（如 135 照相机用摄影镜头以 10 至 30 线对/毫米范围内最为重要，大型专业照相机用摄影镜头以 5 至 20 线对/毫米范围内最为重要），根据摄影镜头 MTF 曲线与横、竖坐标轴间所围的面积大小评价成像质量：在被

评价的摄影头中，所围面积愈大者，即 MTF 的积分值愈大者，其所传递的信息容量愈大，成像质量相对愈好。

3. 根据摄影镜头在某几个特定空间频率处，所对应的实际 MTF 值的高低评价成像质量：当摄影镜头的 MTF 值达到规定指标时，即为合格品；实测值比规定指标高得愈多，其像质愈好，检测 135 照相机的摄影镜头时，该特定空间频率一般选 10 与 30 线对/毫米。为简化测量，一般仅在调焦距离为无限远的条件下，对光轴上点（即视场中心）与特定轴外点，测全开光圈和最佳光圈（F5．6 或 F8）下的 MTF 值。由于画面中所表现的重点极少位于画幅最边缘，而多位于画幅中心附近，故此，上述特定轴外点一般在以所摄画幅中心为圆心的半径为 $Y/\sqrt{2}=0.707Y$（Y 为所摄画幅对角线的 1/2 长度）的圆周上选取，亦即轴外点的位置一般选在距像场中心约 0.35d 的像场处（d 为画幅对角线的长度）；另为检测像场成像质量的均匀性，轴外点一般应选像场中心左、右、上、下四侧的四个对称轴外点（均为 0.35d 像场处），且每一轴外点均测子午 MTF 值和弧矢 MTF 值，然后从四个轴外点所测得之 8 个值中取最低值作为最终测定结果值。显然，这种检测和评价成像质量的方法简便易行、判断迅速，因而近年来在许多光学工厂得到推广。但这种评价方法在精度、客观性、全面性等方面将有所降低。

我国 GB9917-88 标准中规定了 135 照相机Ⅰ级摄影镜头在特定空间频率下，评价成像质量的 MTF 标准。参见表 3—12 所示。

表 3—14 中所示为日本照相机光学仪器检测协会 JCII 于 1976 年颁布的用 MTF 值对 135 照相机镜头进行简易评价的标准。检测时仅在调焦距离为无限远时测下述三点：光轴上及光轴左、右侧各 0.35d（d 为画幅对角线长度）处。因子午 MTF 值一般比弧矢 MTF 值低，故为简化起见，仅检测各点之子午 MTF 值，凡达到表中所列指标者，即为合格产品。此法虽更简便，但精度也进

一步降低。

表 3—12 135 照相机（36mm × 24mm）摄影镜头的 MTF 标准

光圈系数	像场位置	空间频率	
		10 线对/毫米	30 线对/毫米
光圈全开	轴 上	0.6	0.3
	0.707y	0.3	0.15
F8	轴 上	0.75	0.4
	0.707y	0.4	0.2

注：y 为画幅对角线二分之一长度。

表 3—13 120 照相机（56mm × 56mm）摄影镜头的 MTF 标准

光圈系数	像场位置	空间频率	
		10 线对/毫米	25 线对/毫米
光圈全开	轴 上	0.55	0.3
	0.707ω′	0.3	0.15
F5.6	轴 上	0.6	0.35
	0.707ω′	0.35	0.15

表 3—14 特定空间频率下之 MTF 值的指标

光圈系数	像场位置	空间频率	
		10 线对/毫米	30 线对/毫米
光圈全开	轴 上	0.60	0.30
	0.35d（自中心向外量）	0.30	0.15
F8	轴 上	0.75	0.40
	0.35d（自中心向外量）	0.40	0.20

注：1976 年前 JCII 标准中的最佳光圈为 F5.6，而其余各指标数字相同，d 为画幅对角线长度。

4. 根据摄影镜头在某几个特定 MTF 值处所对应的实际空间频率值的高低评价成像质量：当摄影镜头所对应的具体空间频率值达到规定指标时，即为合格品。实测值比规定值高得愈多、摄影镜头的成像质量愈好。MTF 特定值的常见选择如下：国外有一些人主张以摄影镜头的 MTF 值为 0.05 与 0.5 时，各自所对应的空间频率高低，作为共同评价摄影镜头成像质量的指标；也有人主张以 MTF 值为 0.05 与 0.368 时，各自所对应的空间频率高低共同进行评价。由于这两种方法可以把对 MTF 的检测，简化为同时对传统的高调制度分辨率图案与对亮度比为 100∶82 或 100∶76 的低调制度分辨率图案，进行分辨率检测，因而更为简便易行。当然，此法评价的准确性和客观性、全面性等将有较大降低。

5. 根据不同摄影镜头各自之 MTF 曲线所反映出的目视分辨率高低评价成像质量：过 MTF 值为 0.05 点作与横坐标轴平行的水平线，该线与 MTF 曲线相交点所对应的空间频率愈大，则该摄影镜头对高调制度影像的分辨能力愈强。

例：三只最大相对孔径相同且测试条件也相同的摄影镜头 A、B 与 C，其各自对无限远调焦时的 MTF 曲线如图 3—65 所示，试比较三只镜头的性能？

过 MTF 值为 0.05 的那一点，作横坐标轴的平行线，分别与曲线 A、B、C 相交于 A_1 点、B_1 点与 C_1 点。由图知，A_1、B_1、C_1 点各自对应的空间频率为 87 线对/毫米 103 线对/毫米、109 线对/毫米，此即该三镜头各自的目视分辨率值。

过曲线 A、B（或 A、C）交点 D（E），作横坐标轴的平行线，由图知，此水平线与纵坐标轴交点的 MTF 值为 0.19（0.12）。显然，当 MTF 值为 0.19（0.12）时，A、B（A、C）两镜头的成像清晰度相同；当 MTF 值大于 0.19（0.12）时，镜头 A 的影像清晰度比镜头 B（C）好；当 MTF 值大于 0.08 时，镜头 B

影像清晰度比镜头 C 好。

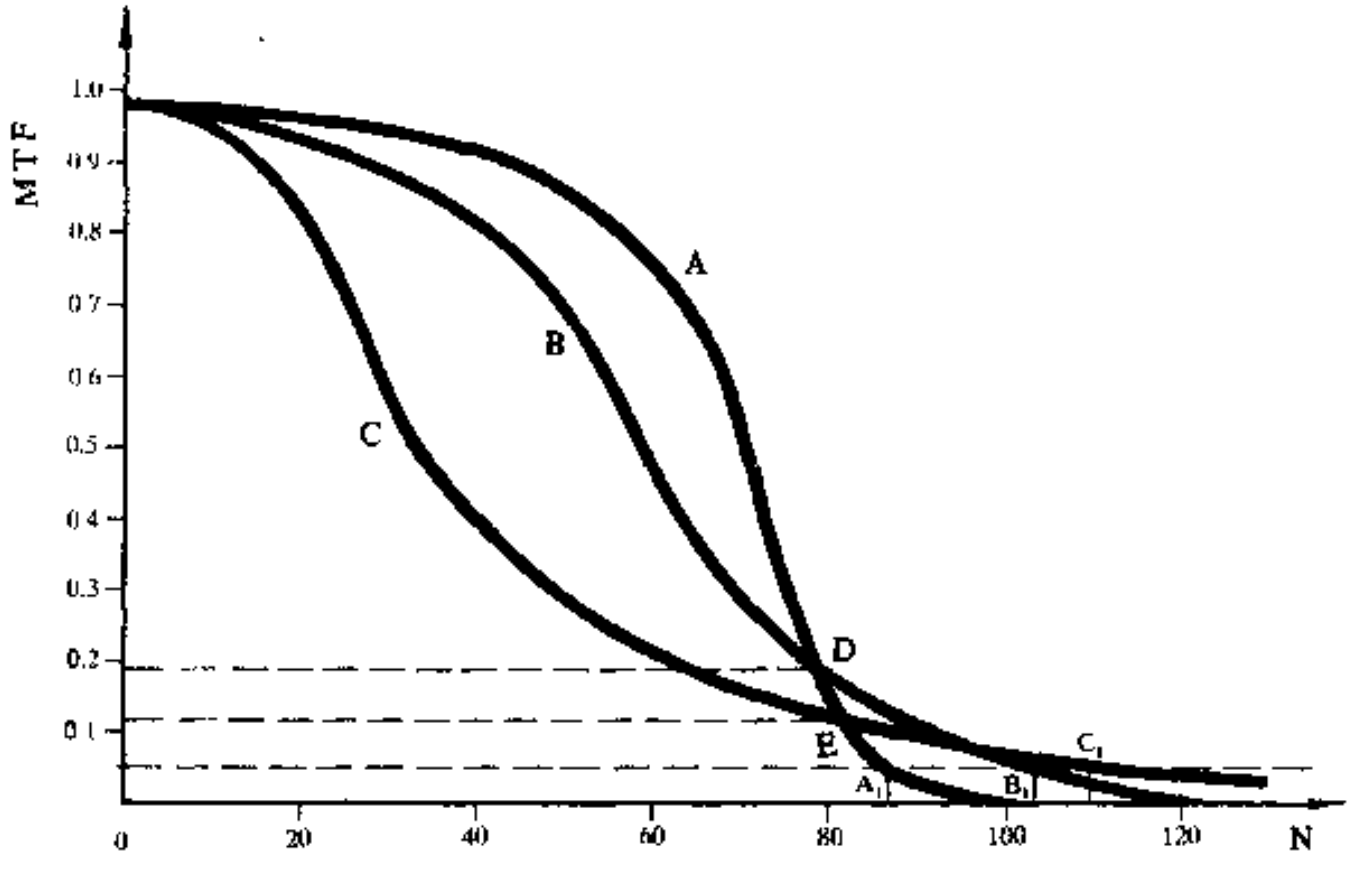


图 3—65

当影像空间频率低于 D（E）点所对应的空间频率时，镜头 A 的明锐度比镜头 B（C）高；反之，镜头 B（C）的明锐度比镜头 A 高。

由于在相当宽的低空间频率和中等空间频率范围内，镜头 A 的 MTF 曲线较镜头 B（C）的 MTF 曲线下降得缓慢，故镜头 A 所摄影像在此范围的成像质量好。由图可知，镜头 A 的 MTF 曲线与横、纵坐标轴所围的面积，远较镜头 B（C）所围的面积大，故镜头 A 的综合品质相对较优，B 次之，C 又次之。而当拍摄高对比度（即高反差）的文件时，三镜头的分辨率却以 C 镜头为最好，B 次之，A 又次之。

综上所述可知，用于普通摄影时，镜头 A 的性能优于镜头 B 与 C；但若用于翻拍高对比度的资料时，镜头 C 又略优于镜头 B 与 A。

不久前有位朋友来家咨询购买摄影镜头事宜。他准备购买一台瑞典哈苏（HASSELBLAD）120照相机，并购买CF系列中广角、标准、长焦距摄影镜头各1只。但面对焦距150mm、180mm、250mm 3款长焦距摄影镜头却无所适从，不知究竟应该选哪一只摄影镜头好。他表示想挑其中成像质量最佳者。

我将这3只长焦距摄影镜头的MTF曲线拿出来请他看。参见图3—66中所示，图中的纵坐标为MTF值，横坐标为像场半径（单位为毫米）。

其中的a、b、c三组图，依次为150毫米、180毫米、250毫米焦距摄影镜头的MTF曲线（均为在白光之下对无限远调焦时所测得的MTF曲线）。左侧一列的三幅图为当摄影镜头的光圈调至F4时，所对应的MTF曲线；右侧一列的三幅图为当摄影镜头的光圈调至F8时，所对应的MTF曲线。图中的实线为弧矢光束的MTF曲线，虚线为子午光束的MTF曲线。每幅图中自上至下的三对曲线依次是空间频率为10线对/毫米、20线对/毫米、40线对/毫米时，所对应的MTF曲线。

然后告知这位朋友：为了全面反映所产摄影镜头的综合成像质量，厂家对一只摄影镜头，一般同时提供在不同测量条件下所测得的一系列MTF曲线。摄影者在观察与比较不同摄影镜头的这些MTF曲线时，应该针对两只镜头在同类条件之下所测得的性质相同的相应那两条MTF曲线进行对比。即应选择两只镜头同在白光下，且同光圈数、同调焦距离（或同影像放大率）、同空间频率（或同视场角）、同性质光束（弧矢光束或子午光束）的那一对相应的MTF曲线进行对比。

对比两条同类MTF曲线时，其中哪条曲线的形状愈相对趋近MTF值为1的理想水平线，即哪条曲线在横坐标轴上之0点处（指像场中心处或零空间频率处）所对应的MTF数值相对愈高、并且沿横坐标轴方向（即随着空间频率或沿着像场半径自左

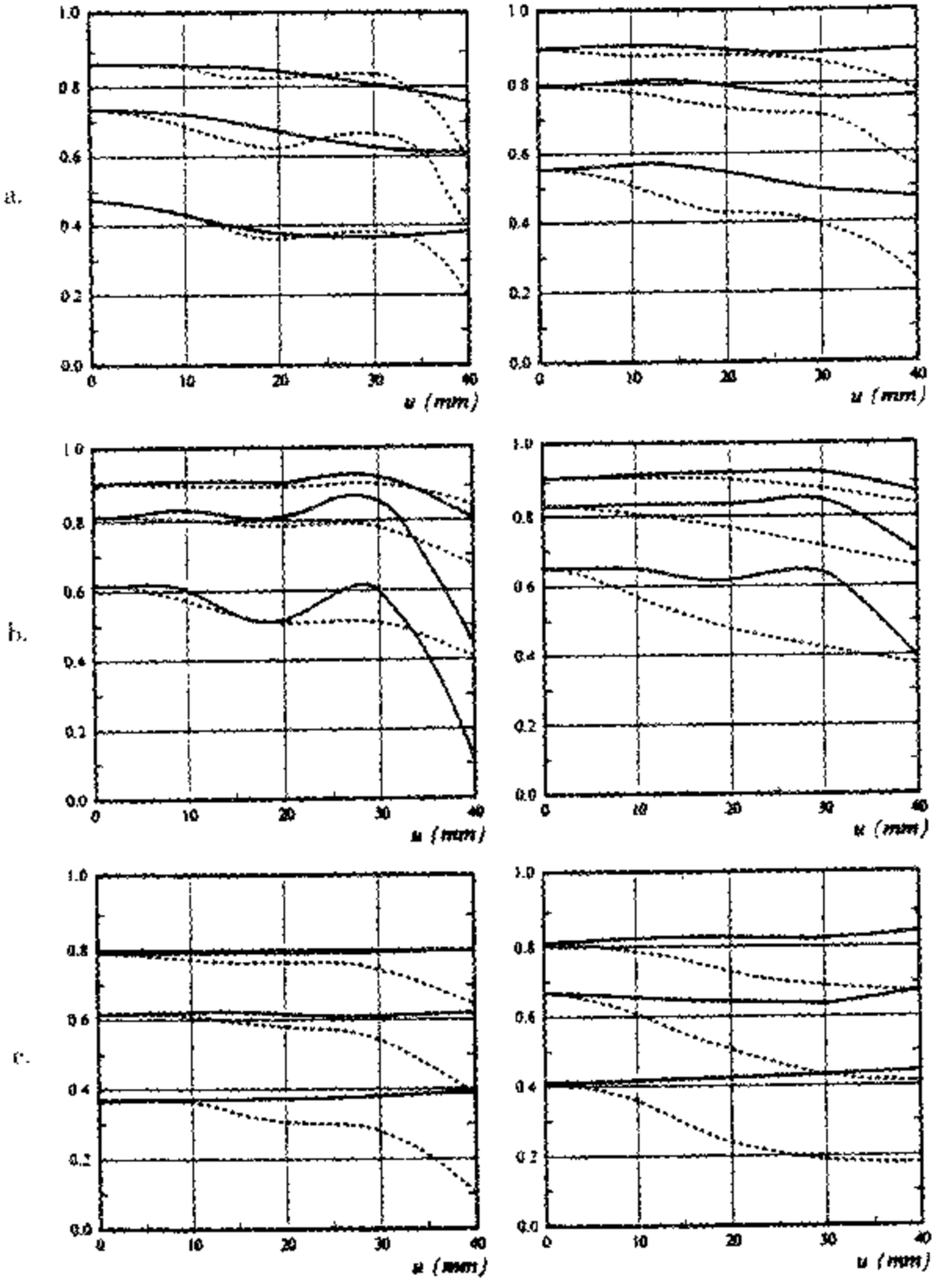
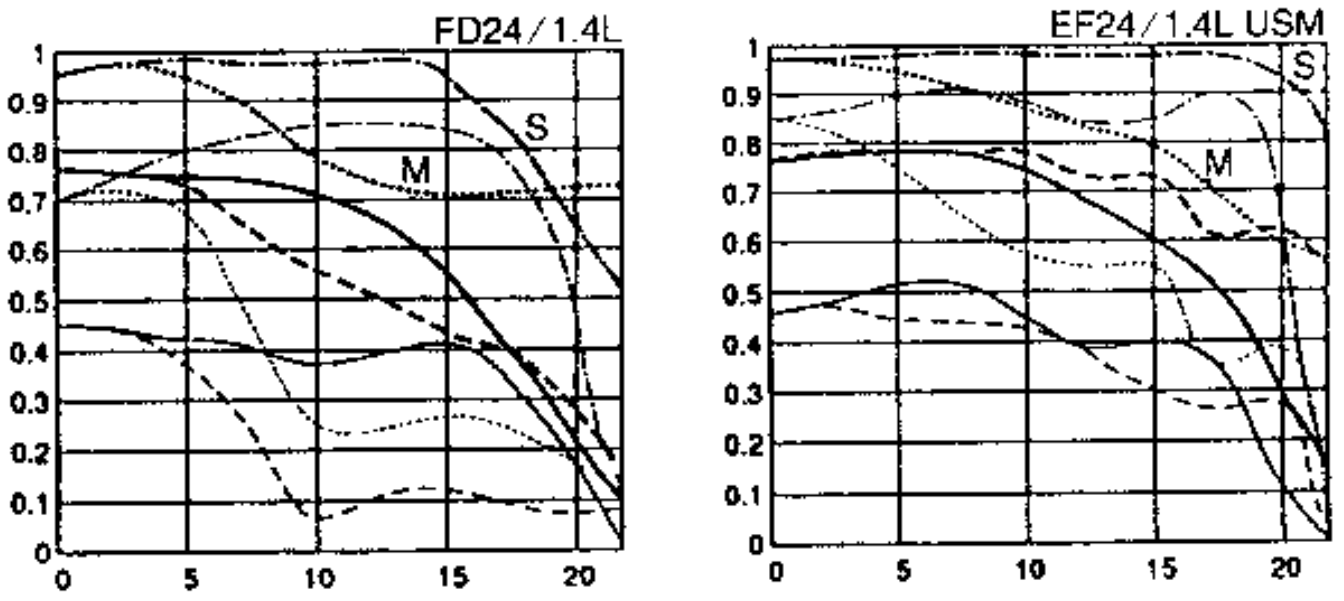


图 3—66　哈苏 120 照相机用卡尔·蔡司摄影镜头

向右的增大）曲线的 MTF 值向下衰减得相对愈缓慢，亦即 MTF 曲线与横、竖二坐标轴所围之面积相对愈大者，且子午 MTF 曲线与弧矢 MTF 曲线的差异愈小者（即二曲线形状趋近一致者），则其在成像时所传输的信息量相对愈多，综合成像质量相对就较好。

尔后，请他根据上述原则，比较这 3 只长焦距摄影镜头的 MTF 曲线。结果他很快就判断出 3 只摄影镜头中，成像质量最好的那款摄影镜头为焦距 180mm 的那只，并决定要购买这只摄影镜头。

日本佳能公司先后生产出了 2 款焦距均为 24 毫米的短焦距专业摄影镜头：FD 24mm F1.4L 型手控调焦广角镜头，及 EF 24mm F 1.4 L USM 型自动调焦广角镜头（后者的光学结构图参见图 5—15 中所示）。2 只镜头的 MTF 曲线图，分别参见图 3—67 中的 a 图与 b 图。图中的纵坐标为 MTF 值，横坐标为像场半径（单位为毫米）。



a.　　b.

图 3—67　佳能 24mm F1.4L 镜头的 MTF

图 3—67 中的四条粗曲线（粗点划线、粗点线、粗实线、粗

虚线）均为在空间频率 10 线对/毫米条件下测得的 MTF 曲线，四条细曲线（细点划线、细点线、细实线、细虚线）均为在空间频率 30 线对/毫米条件下测得的 MTF 曲线。粗、细实线与粗、细虚线均为在 F1.4 条件下测出的 MTF 曲线，粗、细点划线与粗、细点线均为在 F8 条件下测出的 MTF 曲线。粗、细实线及粗、细点划线均为弧矢光束的 MTF 曲线，粗、细虚线及粗、细点线均为子午光束的 MTF 曲线。

比较左右两图中在相同条件下测试出的同类 MTF 曲线的形状可知，FD 24mm F1.4L 型广角镜头与 EF 24mm F1.4 L USM 型广角镜头相比，后者的 MTF 数值较高、MTF 曲线向下衰减得较缓慢，亦即 MTF 曲线与二坐标轴所围之面积相对较大，故此，EF24mm F1.4 L USM 型广角镜头的成像质量，要比另一款摄影镜头的成像质量要好。这是由于后者在光学设计过程中，采取了下列先进光学技术的结果：采用了一片低色散的 UD 玻璃，以下降广角镜头容易产生的垂轴色差；第 9 片透镜为非球面透镜（后表面为非球面），以很好地校正球差与畸度；并采用了调焦补偿组元的结构，以及在摄影镜头内部的透镜片之间，采用了遮挡杂光的矩形光阑等措施。参见图 5－15 中所示。

当然，由于供单镜头反光照相机用大相对孔径广角摄影镜头的设计难度，远较普通标准摄影镜头大的缘故，佳能这款 EF 24mm F1.4L USM 专业摄影镜头尚存在着一点不足：由图中可知，所有各对在相同条件下测试出的弧矢 MTF 曲线（S）与子午 MTF 曲线（M），在形状上均存在着比较明显的差异。这表明该摄影镜头弧矢光束与子午光束的成像质量存在着比较明显的差别——二者不够均衡。尤其在摄影者常用的 F8 的光圈下，空间频率为 10 线对/毫米及 30 线对/毫米的二对 MTF 曲线中，子午 MTF 曲线（粗点线及细点线）沿横坐标轴方向的衰减远较弧矢 MTF 曲线（粗点划线及细点划线）快速而强烈。亦即该镜头在 F8 光圈下，

子午光束的成像质量远较弧矢光束的成像质量为差。这说明该摄影镜头尚残存着略大的像散等像差，以至用其拍摄被摄景物的影像时，摄影镜头对“与画幅直径方向平行之线条”的分辨能力——径向分辨率高，从而使该类影纹的层次、细节与清晰度好；但对“与画幅直径方向垂直之线条”的分辨能力——切向分辨率较差，以至使该类影纹的层次、细节与清晰度也较低。由于子午曲线与弧矢曲线在画幅边缘处的差异最大，故此这一缺点在画幅边缘部位尤为明显。这也是佳能这款 EF 24mm F1.4L USM 专业摄影镜头成像性能美中不足的遗憾之处。

近年来，摄影镜头有限离焦像平面处的 MTF 值也成为光学设计者与摄影者关心的性能，国外有些产品已达到一定水平。这一性能对改善景深范围内影像的清晰度与明锐度，对弥补调焦误差等均具有很重要的意义。

1972 年，格兰格（E·M·Granger）与卡佩里（K·N·Cupery）提出了“评价摄影镜头主观成像质量的光学质量函数——主观质量因子 SQF（Subjective Quality Factor）”的观点。

SQF 评价体系是建立在 MTF 曲线基础上的评价方法：MTF 曲线是以 MTF 值为纵坐标，以空间频率为横坐标的；而 SQF 评价体系是以 MTF 值为纵坐标，以空间频率的常用对数为横坐标的。亦即 SQF 评价体系的本质是将 MTF 曲线沿左右方向进行对数压缩，从而形成一肥胖的新曲线。

SQF 评价体系认为由于受人眼视觉系统分辨能力的制约，人眼难于分辨开过低频率与过高频率之线条。人之视觉系统的有效频率响应特性范围为 1.6 – 100lp/mm，其相应的对数范围为 0.2 – 2。故此，SQF 评价体系认为在研究摄影镜头成像质量时，应重点研究在人眼有效频率响应特性范围之内的成像质量。

于是，SQF 评价体系提出：横坐标经对数压缩后的 MTF 曲线在上述 0.2～2 的范围之内所包围的面积，与 MTF 值为 1 的水

平线（即理想的 MTF 曲线）在上述 0.2－2 的范围之内所包围的矩形面积之比的比值大小（为小于 1 的无量纲数值），为评价一摄影镜头综合成像质量的标准。并规定，该比值在 95 分以上者为 A＋级、在 90 分以上者为 A 级、在 85 分以上者为 B＋级、在 80 分以上者为 B 级、在 70 分以上者为 C＋级、在 60 分以上者为 C 级、在 50 分以上者为 D 级、在 50 分以下者为 F 级。其中认为该比值达 A＋者为极好的摄影镜头，A 级者为接近极好的摄影镜头，B＋级为很好的摄影镜头，B 级者为相当好的摄影镜头，C＋级者为满意的摄影镜头，C 级者为合格的摄影镜头，D 级者为不良的摄影镜头，F 级者为不能接受的摄影镜头。

已知同一摄影镜头针对不同空间频率所测量的以像场半径为横坐标的 MTF 曲线不同，在不同光圈之下所测量的 MTF 曲线也不同。此外，为了获得相同的影像清晰度，当同一底片放大为不同尺寸的照片时，放大倍率愈大，观察者对底片上之影像的分辨率要求就愈高，即摄影者对较高空间频率下之 MTF 值的具体大小就愈感兴趣。亦即当人眼观察不同放大率的照片时，人眼对原底片上所敏感的频率响应特性范围将有所不同。为了简化检测工作量，一般仅针对若干放大倍率下所关心的相应空间频率范围进行检测——检测其各自在一系列不同光圈数下的 MTF 值，并将其与理想值相比，最后再根据比值的具体高低判断其属于 SQF 指标中的那一级摄影镜头。例如，美国《大众摄影》杂志即按 3.5×5 英寸、4×6 英寸、5×7 英寸、8×10 英寸、11×14 英寸、16×20 英寸、20×24 英寸等照片尺寸，分别标示出其各自具体的 SQF 级别，以供摄影者参考。

为了更全面地评价摄影镜头的成像质量，光学公司在提供 MTF 曲线的同时，一般还提供这只摄影镜头的畸变像差曲线、分光透光率曲线、像场相对照度曲线。德国产施耐德西玛 S 型焦距 120 毫米、F5.6 摄影镜头的畸变像差曲线、分光透光率曲线、像

场相对照度曲线分别参见图 3—29a、图 3—73、图 3—74 中所示。

第五节　镀膜与彩色贡献

一、杂光的产因与危害

杂光指摄影时到达像平面处的非成像光线。

摄影镜头一般由若干片透镜组成，其中某些透镜表面直接与空气接触。由反射和折射定律可知，光线投射到透镜与空气相接触的表面时，除有一部分进入（或射出）透镜并发生折射外，一般还有一部分被反射回原介质中。此外，透镜内部存在的气泡、杂质、条纹，透镜表面的霉点、灰尘、指纹等，均会使通过摄影镜头的部分成像光线发生散射。镜筒内壁和镜片外圆周表面若处理不好，也会使投射到其表面上的光线发生反射。参见图 3—68 所示。

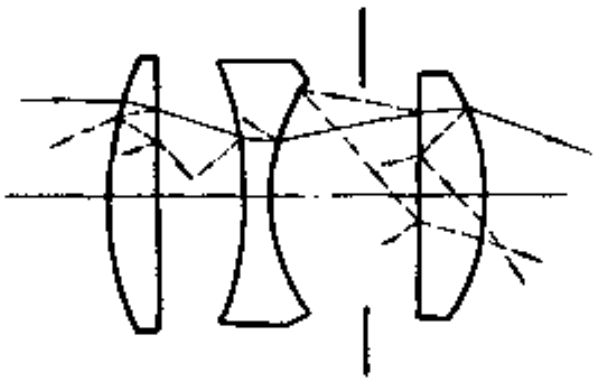


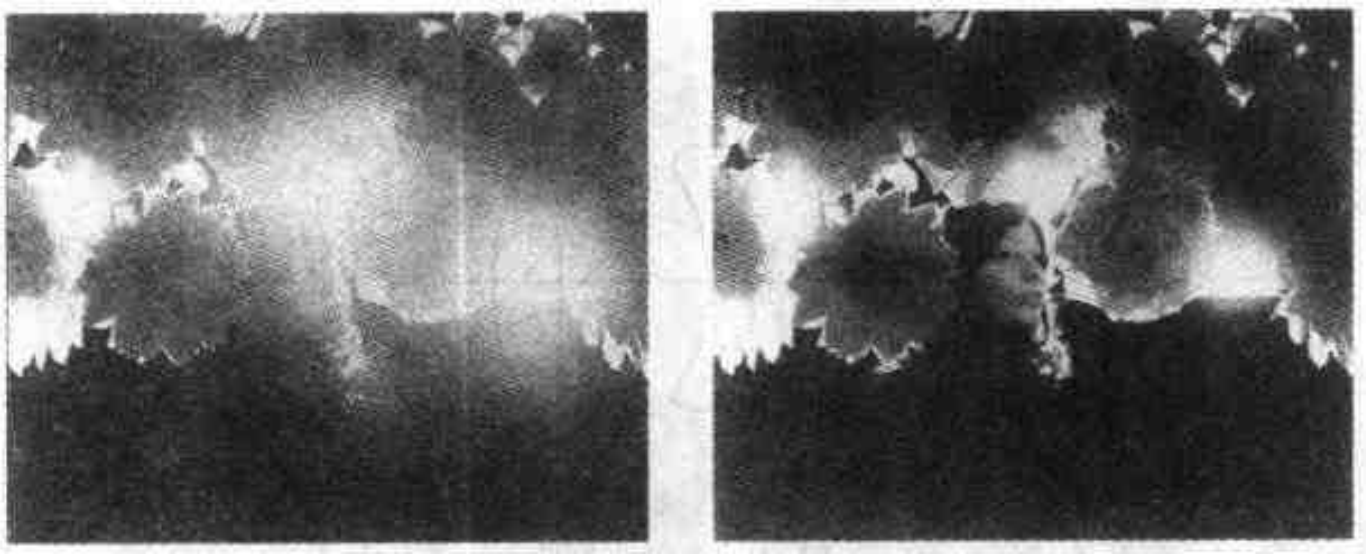
图 3—68　杂光

发生在摄影镜头内部的上述种种反射和散射现象，不但使摄影镜头成像光线的通光能力（即透光率）明显减弱，还会使这些反射和散射光线经过多次反射、折射后，沿不同路线以杂光形式

到达成像平面处。感光胶片受到这些非成像光线的照射后，将使像平面处的影像反差减少，画面的影调范围压缩，该影像的质感和层次损失，影像的明锐度下降，清晰度降低（有如看电影时突然打开门窗后的效果），使画面好似蒙上一层灰雾，甚至形成明显的眩光（又称晕光）和幻影（该幻影是光圈通光孔所结成的像）。显然，镜头内存在的杂光对被摄景物阴影部位所成影像的影响尤为显著。

尤其是当被摄范围之内或之外的强光源（如逆光摄影时的太阳）所投射出的强光线，照射到摄影镜头的第一片透镜表面上时，这类超高亮度强光线经摄影镜头透镜片反射所生成的杂光，对最终所摄影像质量的不利影响尤为严重。故此，建议摄影者在逆光摄影时，务必要安装上相应的遮光罩，以有效地预防被摄范围之外的太阳光，使之不至直接照射到摄影镜头的前方透镜片上。

图 3—69a 中所示为使用未镀膜、从而存在严重杂光缺陷之镜头摄影时的画面效果——画面中存在严重的眩光。b 图为镀膜镜头所摄效果。



a.　　b.

图 3—69

在彩色摄影中，杂光还将使彩色影像的色彩饱和度明显下降。

上述缺陷随着摄影镜头中镜片的组数（每组有2个空气接触面）的增多而急剧严重，参见表3—15所示。

当然，在彩色摄影中，有时也可有意利用逆光光源（如太阳）在摄影时产生的一组彩色幻影光斑，创作出强调独特气氛和美感，以及具有新颖艺术效果甚至神秘感的画面。

表3—15

镜头内与空气接触的透镜表面数目	透光率τ（%）			
	未镀膜	镀单层膜	镀三层膜	高级多层膜
2	90	96	99	99.8
4	81	92	98	99.6
6	73	88	97	99.4
8	66	85	96	99.2
10	59	82	95	99.0

二、单层镀膜与多层镀膜

为了降低透镜的反光损失，提高摄影镜头的透光能力，减少眩光，增大反差，改善色彩还原，使色彩更为鲜明，从而提高影像的清晰程度，光学界普遍采用了在透镜片与空气接触表面上，镀增透膜（简称镀膜）的加工工艺。当镀膜层厚度，刚好使膜层表面之反射光 R_1 与透镜表面之反射光 R_2 的光程差为光波波长的一半（$\lambda/2$）时，光的干涉现象将消除或减弱上述表面反光，如图3—70所示。

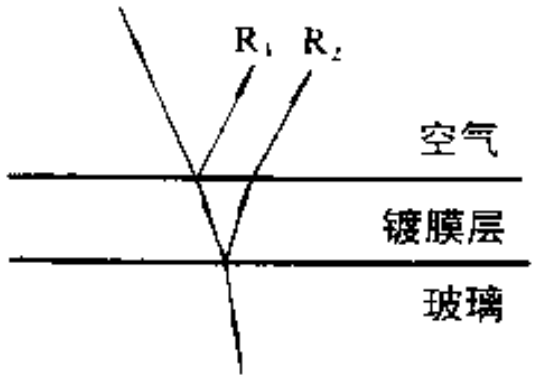


图 3—70 镀膜后光的干涉

镀膜有单层膜和多层膜两种形式，单层膜容易镀，成本也低，但效果不如多层膜好，而且透镜组数愈多，两者差别愈明显。参见表 3—15 中所示。图 3—71 为日本保谷（HOYA）滤光镜未镀膜、镀单层膜、镀多层膜时的反光率曲线对比，图 3—72 为透光效果对比。

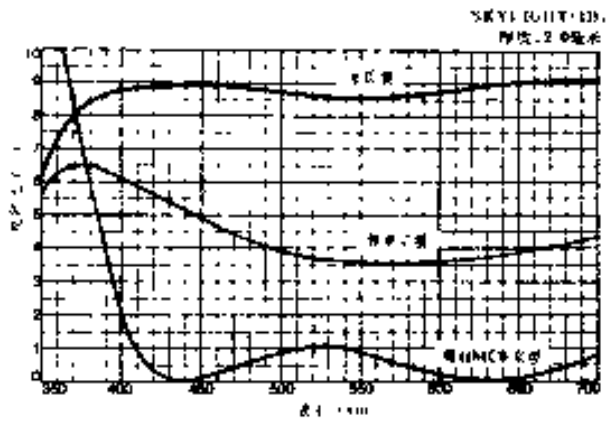


图 3—71 镀膜与否的反光率曲线

世界上最先采用多层镀膜工艺的是日本旭·潘太克斯照相机的超级多层镀膜摄影镜头（Super Multi Coat）。图 3—69b 为该类镜头所摄画面效果。

镀膜方式主要有物理镀膜和化学镀膜两种。其中物理镀膜较容易控制，因而应用较广泛。但镀膜牢度不如化学镀膜，因而不宜经常反复擦拭。

1. 未镀膜　2. 镀单层膜　3. 镀多层膜

图 3—72　镀膜与否的透光效果

近年来国外出现了一些新式镀膜工艺，例如，日本富士公司可镀十一层增透膜的电子束多层镀膜工艺（EBC），佳能公司的超级分光式镀膜工艺（Super Spectrum Coat）。

已镀膜与未镀膜的摄影镜头，在外观上很容易区别：已镀膜的透镜表面，其反光呈蓝色、紫色、橙色等；而未镀膜的透镜表面，其反光呈白色。

镀膜质量的高低可通过下述方法鉴别：把摄影镜头后端拧上黑色后盖，使后方光线无法进入已遮严的镜头后端，或遮严单镜头反光照相机的取景目镜，把光圈开至最大，然后使摄影镜头朝向明亮景物，人自镜头正前方观察第一片透镜表面上自己脸部的反光影像，该影像愈弱、愈暗淡、愈不清晰愈好。或用最小光圈和较短快门时间拍摄黑暗背景前的明亮的小电灯，如所摄照片上该灯光好似一明亮星星，四周很黑，则镀膜质量好；若照片上有大面积的光亮区域，则说明眩光严重；若照片上有一些多边形光斑、光环，则说明幻影严重。

由于滤光镜有二个空气表面，故将使摄影镜头的眩光增强，尤其是未镀膜的低档滤光镜。采用多层镀膜的摄影镜头时，若需

要安装滤光镜后拍摄，则建议使用具有多层镀膜的滤光镜，以充分发挥该摄影镜头的最佳性能。

目前，各光学公司对膜层材料和厚度等的选择、控制，多依靠计算机辅助系统进行，既考虑到对杂光的有效消除，又考虑到对光线在透镜中之传递损失引起的色彩还原失真进行相应补偿。

摄影镜头中各透镜的外圆周表面也会产生反光，从而形成杂光。为了减少透镜外圆周表面所生成的杂光，一般在生产中将透镜片的外圆周表面磨得很细，再涂上一层厚度适宜，且流动性、渗透性能很好的无光泽黑涂料，以吸收那些投射到透镜外圆周处的光线，不使之形成杂光。涂料若流动性，渗透性欠佳，则外圆周表面易残余未涂到的部分而使残存反光较多，而涂料涂得太薄不易吸收尽杂光，涂得太厚又易引起各透镜片不同心。

为了减少杂光，在摄影镜头镜筒内壁上，常车出螺纹沟槽，以减少反光并便于吸收杂光。同时，摄影镜头镜筒内表面及光圈叶片、快门叶片等表面上，均有不反光的黑色涂层，以便吸收镜头内部的残存反光。

此外，摄影时安装适宜的遮光罩，可避免被拍摄范围外之强光投射到第一片透镜上，从而避免了这一类强光在镜头内部形成强烈杂光。

光学系统像面上杂光曝光量 $E_{杂}$ 与像面上全部曝光量 $E_{全}$ 之比称为杂光系数 η（$\eta = E_{杂}/E_{全}$），我国国家标准 GB9917-88 标准中规定定焦距Ⅰ级、Ⅱ级摄影镜头及变焦距摄影镜头的杂光系数 η 应分别≤3%、5%、5%（在光阑 F8 下测量摄影镜头光轴上的数值）。

三、彩色贡献指数（CCI）

在一些新型摄影镜头中，为了更好地校正像差，常常采用一

些高折射率的光学玻璃（如重火石玻璃 SF），而这类光学玻璃一般对蓝紫光具有一定的截止能力，故使透过该玻璃的白光稍偏点黄色。增透膜层的种类不同，也将使透过膜层的光线产生不同程度的偏色现象。

由于不同摄影镜头所选镜片的材质、镀膜层的种类、镜头的结构、透镜的片数等存在差异，因此各镜头的分光透光率曲线形状一般不同，从而使其各自具有不同的彩色还原性能（即显色特性）。甚至有的摄影镜头使所摄画面出现偏暖（偏红色）或偏冷（偏蓝色）的偏色现象。

摄影者希望摄影镜头具有良好的彩色平衡，即希望镜头忠实记录景物之色彩、色调的能力愈高愈好。尤其是使用彩色反转片摄影和进行翻拍摄影时，摄影镜头彩色平衡的好坏直接关系到所摄画面的质量高低，以及艺术创作的成败与否。即使是普通彩色摄影也应有优良的彩色还原性能。

彩色贡献指数 CCI（Color Contribute Index 又称色增生指数）是评价摄影镜头彩色平衡性能的重要指标。一般以摄影镜头对彩色胶片感蓝层（B）、感绿层（G）、感红层（R）等各层感光的相对贡献率表示，并可用专用测量仪器进行测定。

国际标准（ISO6728-1983）对摄影镜头彩色贡献指数 CCI 的标准数值规定如下：B/G/R 分别为 $0^{+3}_{-4}/5^{+0}_{-2}/4^{+1}_{-2}$。

有的光学公司直接提供所生产之摄影镜头的分光透光率曲线，以供客户比较、挑选。图 3—73 中所示即为德国施耐德牌西马 S 型 120 毫米、F5.6 摄影镜头的分光透光率曲线。

由于彩色贡献指数 CCI 把摄影镜头的色再现性能（即彩色平衡性能）数值化，因而比分光透光率曲线的表示方法更简单、也更便于比较。

当所设计的光学系统对像差校正得很好时，欲调整该光学系统的 CCI，一般多采用改变所镀增透膜层之种类的方法来实现，

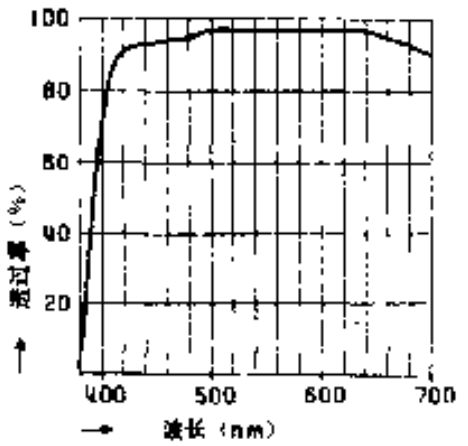


图 3—73 分光透光率曲线

而不轻易再调整光学系统中透镜的材料。

第六节 像场照度均匀率

由被摄景物投射出的光线，经摄影镜头会聚后，在照相机或电影摄影机的像平面（即感光胶片乳剂面）处，结成清晰影像，并使像平面处具有相应的照度。

摄影镜头像平面处的照度（即像场照度）大小，与被摄影景物的亮度大小成正比。

当被摄景物各部位的亮度呈均匀分布时，像平面处的照度分布却并不均匀——像场中心的照度最高，而自像场中心至像场边缘，照度依次迅速降低。

一、像场中心的照度

摄影镜头像场中心（即摄影镜头光轴与像平面的交点）处的照度 E_0，由下述公式决定。

$$E_0 = \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \frac{1}{(m+1)^2} \cdot \tau \cdot \zeta$$

$$= \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \frac{(l - f')^2}{l} \cdot \tau \cdot \zeta$$

$$= \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \left(\frac{f'}{l'}\right)^2 \cdot \tau \cdot \zeta \qquad (3—30)$$

式中 π 为圆周率

B 为被摄景物亮度　　f' 为焦距

F 为摄影时所选的光圈数　　τ 为摄影镜头的透光率

m 为摄影时的影像放大率　　ζ 为摄影镜头杂光修正系数。

l 为物距

l' 为像距

当摄影镜头调焦至无限远时，由于影像放大率为零、物距为 ∞、像距等于焦距，故上式可简化为

$$E_0 = \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \tau \cdot \zeta \qquad (3—31)$$

二、像场边缘的照度与像场照度均匀率

在摄影镜头像场上任一轴外像点处的照度 E_ω，计算公式如下

$$E_\omega = E_0 \cdot H \cdot \cos^4 \omega'$$

$$= \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \frac{1}{(m+1)^2} \cdot \tau \cdot \zeta \cdot H \cdot \cos^4 \omega'$$

$$= \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \left(\frac{1 - f'}{l}\right)^2 \cdot \tau \cdot \zeta \cdot H \cdot \cos^4 \omega'$$

$$= \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \left(\frac{f'}{l'}\right)^2 \cdot \tau \cdot \zeta \cdot H \cdot \cos^4 \omega' \qquad (3—32)$$

式中 H 为通光面积渐晕系数

ω' 为轴外像点的主光线与光轴的夹角。

由于渐晕将使像场边缘照度下降，故渐晕系数值愈大愈好。

但在光学设计中，有时为了提高成像质量，而有意遮拦掉一部分像差不良的光线（如利用镜筒对斜射光束进行阻挡，使之部分光线不能到达像场），这样就使像场边缘照度不足的现象更为严重。摄影镜头的视场角愈大，这种照度减低的现象就愈严重。即使某斜射光束未受到镜筒前端的阻拦而全部投射到摄影镜头前镜片的前表面上了，其仍可能受到镜筒长度、镜片压圈直径、镜片直径等的影响，以至只有一部分光束可以继续投射到后面的镜片上（其余将被折射到镜筒内壁等上而被吸收掉）。

当摄影镜头调焦至无限远时，上式可简化为

$$E_\omega = \frac{\pi B}{4F^2} \cdot \tau \cdot \zeta \cdot H \cdot \cos^4 \omega' \qquad (3—33)$$

由公式（3—32）、（3—33）可知，轴外像点处的照度 E_ω 与 $\cos^4\omega'$ 成正比，故二公式又称像场轴外像点（或像场边缘）照度的余弦定律。显然，摄影镜头的半像场角愈大，像场边缘的照度愈明显下降。

由公式（3—30）、（3—32）可知

$$\frac{E_\omega}{E_0} = H \cdot \cos^4 \omega' \qquad (3—34)$$

引起轴外像点照度按余弦定律下降的原因如下：轴外像点是由斜射光束通过摄影镜头结成的影像。当被摄景物为一亮度均匀的物体时，轴外物点向摄影镜头入瞳所投射的光通量，必然比轴上物点向该入瞳所投射的光通量少；若光束大小相同时（即传输的能量不变时），则该光束与像平面成倾斜相交时，像平面上所受到的照度，必然比光线与像平面成垂直相交时所受到的照度低；斜射光束的实际投射距离大于以光轴为中心的水平光束的投射距离，根据照度与距离的平方成反比的“照度反比定律”可知，轴外像点的照度势必比轴上像点的照度低。

表 3—16 中列举了轴外像点偏离光轴的角度 ω' 为不同值时的

像场照度均匀率（轴外像点照度 E_ω 与像场中心照度 E_0 之比的百分数值，设 H = 1）。

表 3—16　　不同轴外像点的像场照度均匀率

ω'	0°	5°	10°	12°	15°	20°	25°	30°
$\frac{E_\omega}{E_0} \times 100\%$	100%	98.5%	94%	91.5%	87%	78%	67.5%	56.3%
ω'	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	
$\frac{E_\omega}{E_0} \times 100\%$	45%	34.4%	25%	17%	10.8%	6.3%	3.2%	

由表 3—16 可知，使用长焦距摄影镜头和标准摄影镜头拍摄时，像场边缘与像场中心的照度差别较小，只有使用一些较大的广角摄影镜头摄影时，上述差别才较明显。故此，当为单镜头反光照相机购买配套的超广角摄影镜头时，应将欲购摄影镜头安装到所用单镜头反光照相机上，并通过取景器观察被摄景物，要求取景影像的四角应无明显变暗的现象。

我国国家标准 GB9917-88 标准中规定：供拍摄 6cm × 6cm 画幅用的摄影镜头，其像场照度均匀率（$\frac{E_\omega}{E_0} \times 100\%$）应大于或等于 30%；供拍摄 36mm × 24mm 画幅用的摄影镜头，其 $f \leqslant 38mm$，$f > 38mm$ 时像场照度均匀率应分别大于或等于 20%、30%。

拍摄时适当收小光孔（即选用较大的光圈系数值），可使渐晕现象减弱。某些超广角摄影镜头为改善像场边缘的照度，采用适当增大光圈前方各透镜直径、从而有意在摄影镜头中使轴外物点光束成像时残存一定像差，以使公式（3—32）、（3—33）中的 $\cos^4\omega'$ 降为 $\cos^3\omega'$，使渐晕现象减弱（参见图 5 - 18 所示）。此外，在镜头上装置中心密度较大、颜色较深，且自中心向外圆密度逐渐降低，颜色逐渐变淡的环式渐变中性灰滤光镜，人为地降低视场中心的照度，也可改善整个像场的照度均匀性。

放大照片时，由于放大镜头本身也存在像场边缘照度较低的缺陷，故在一定程度上刚好可补偿底片边缘曝光不足的缺陷。

有的光学公司直接提供所生产之摄影镜头的像场相对照度曲线，以供顾客进行比较与选择。图 3—74 中所示即为德国施耐德牌

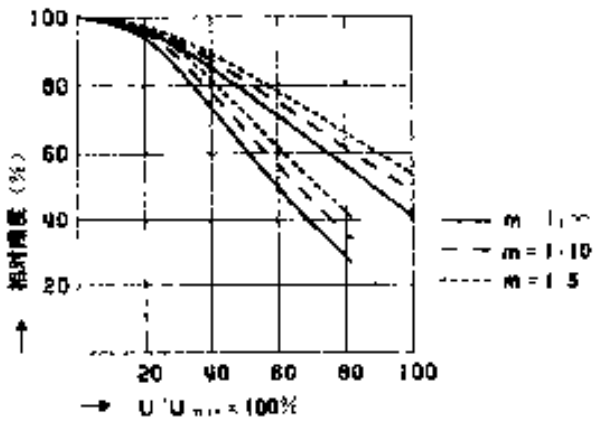


图 3—74 像场相对照度曲线

西玛 S 型 120 毫米、F5.6 摄影镜头的像场相对照度曲线。

第七节 摄影镜头的机械结构

摄影镜头中各透镜片需借助机械结构固定在镜筒内（既要保持彼此光轴的精确重合，又要保持彼此间距的准确）。此外，摄影镜头与照相机、电影摄影机机身的联接，需依靠机械结构，摄影镜头的调光圈、调焦、变焦等也均需依靠机械结构。

一、摄影镜头与机身的联接

可更换式摄影镜头与机身之间的联接，应能满足下列要求：在结构上既应具有足够的强度、能承受镜头全部重量、安全可靠，又要装卸迅速、操作简便，最好有防误操作的保险锁钮，还要坚固耐磨；在尺寸精度上应能保证定位准确，镜头光轴应通过

曝光窗中心并与曝光窗平面垂直，镜头的像面定位距一般应与机身像面定位距精确相等；既能够将必要的信息自镜头传递到机身上（如将预选光圈的大小传递到测光电路中，将闪光灯启闪信号自镜头通过机身传递到闪光灯上），又能将必要的信息甚至动作自机身传递到镜头上（如将自动调焦的信息、电动变焦的信息、光圈的缩开、镜间快门的上弦和释放等传递到镜头上）。

可更换式摄影镜头与机身的联接结构，主要有下列几种：

1. 卡板式：摄影镜头固定在卡板上，使用时只需把该卡板往机身前端的座板上卡牢即可。此联接结构可使镜头更换简便迅速、精度高、安全可靠，但体积略大。目前主要应用在大型专业照相机上。如图 3—75 所示。

2. 卡口式：摄影镜头镜筒后端有 3 至 4 个卡爪，机身镜头座上有相应的缺口。安装摄影镜头时，需使各卡爪分别与相应的缺口对正，把摄影镜头插入镜头座内、并插到底，然后正转（如美能达 135 照相机）或反转（如尼康 135 照相机）该摄影镜头至终点（一般约转动 1/4 至 1/6 圈），即可将镜头卡住，并被锁紧装置锁牢。卸镜头时需先释放镜头锁钮（哈苏 120 照相机还需先给快门上弦），尔后才可按相反顺序卸下镜头。此类联接结构可使摄影镜头的装卸简便迅速、定位精度高、安全可靠、体积小。故被广泛用于单镜头反光照相机上，以及部分反光取景式电影摄影机上。图 3—76 中所示各图为常见 135 单镜头反光照相机上的卡口式镜头联接装置，图 3—77 所示为法国产卡米弗莱克斯 35 毫米电影摄影机的卡口式镜头联接装置（因系早期产品故尚无锁紧机构）。

3. 锁环式：在机身的摄影镜头座上有 3 至 4 个卡爪，摄影镜头镜筒后端的锁环上有相应缺口（如佳能和玛米亚 RB67 型单镜头反光照相机，参见图 3—78 中所示），或摄影镜头镜筒后端有 3 至 4 个卡爪，机身镜头座的锁环上有相应缺口（如江光 1204 型、

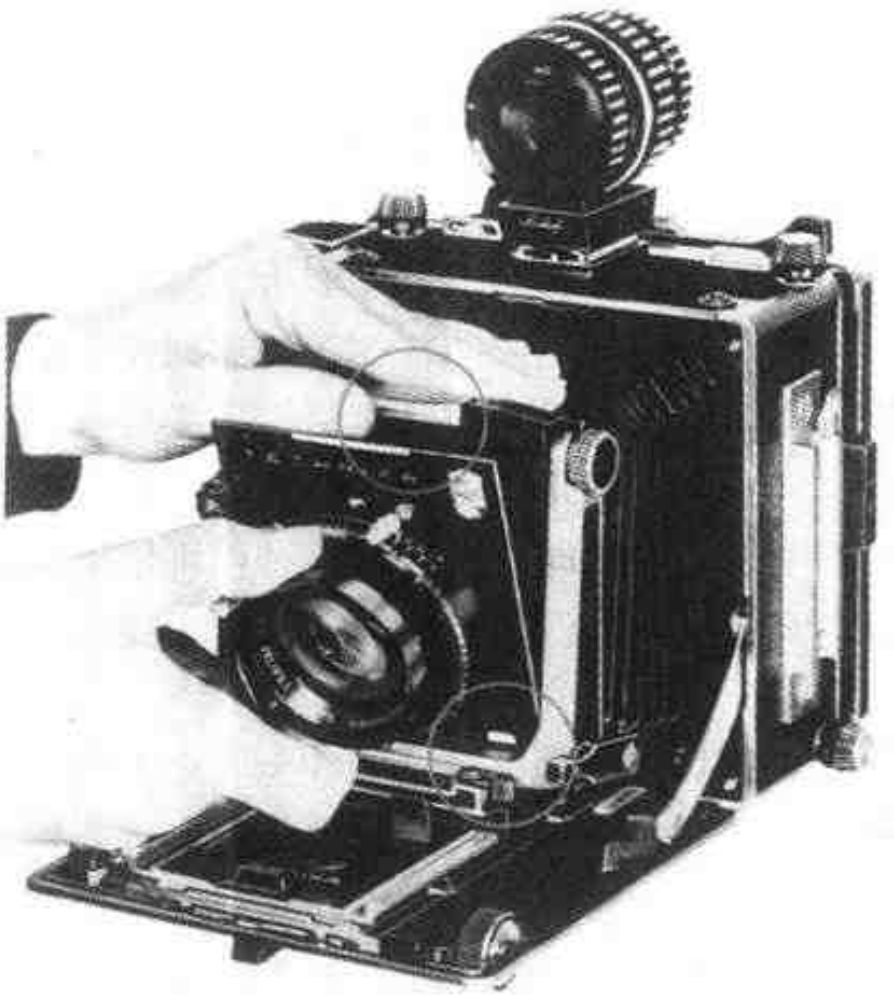


图 3—75 林哈夫大型专业照相机的
卡板式镜头联接装置

阿里弗莱克斯 535 型、435 型、BLⅢ型、BL4 型等 35 毫米电影摄影机)。

安装摄影镜头时，需使各卡爪分别与相应的缺口对正（某些电影摄影镜头的一个卡爪上有一销孔，安装时应使该销孔与镜头座上的定位销钉对正），把摄影镜头插入镜头座内，并插到底，然后正转锁环至终点位置，即可将摄影镜头卡牢（佳能 FD 摄影镜头的锁环上还有锁紧机构，以防摄影者的误操作）。卸镜头时需先释放镜头锁钮（玛米亚 RB 型照相机还需先给快门上弦），尔后才可按相反顺序卸下镜头。采用此类联接结构的摄影镜头，装卸简便迅速、定位精度高、安全可靠。故目前应用很广泛。图

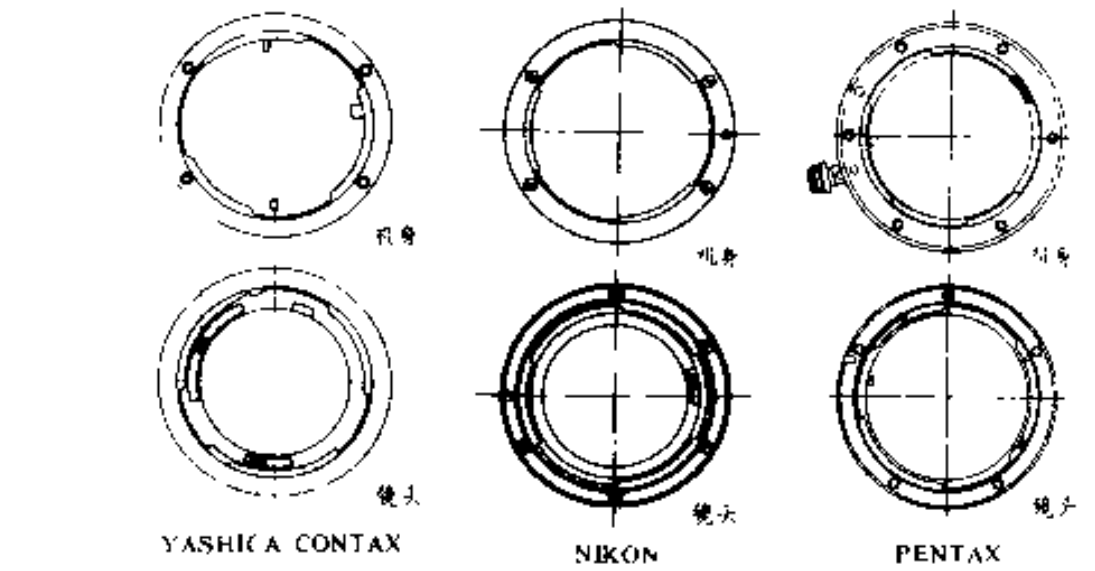


图 3—76　照相机的卡口式联接装置

3—79 所示为江光 1204 型 35 毫米电影摄影机所装摄影镜头之后端的外形图。

4. 锁舌式：在机身镜头座内藏有锁舌，安装摄影镜头时，应用双指夹紧两释放锁钮，使锁舌缩回，令摄影镜头镜筒后端的定位孔与镜头座内的定位销对正，把镜头插入镜头座内，并插到底，松开释放锁钮，则锁舌立即伸出将镜头锁牢。卸镜头时的操作顺序正好相反。采用此类联接结构的摄影镜头装卸简便迅速、安全可靠，但定位精度略低。如和平 S—35Ⅱ型、阿里弗莱克斯 35ⅡC 型 35 毫米电影摄影机，参见图 3—80 所示。

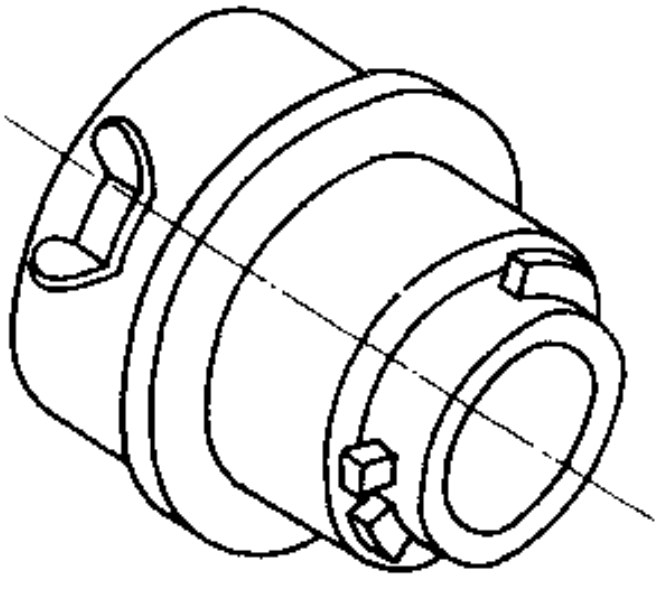


图 3—77 电影摄影机的卡口式联接装置

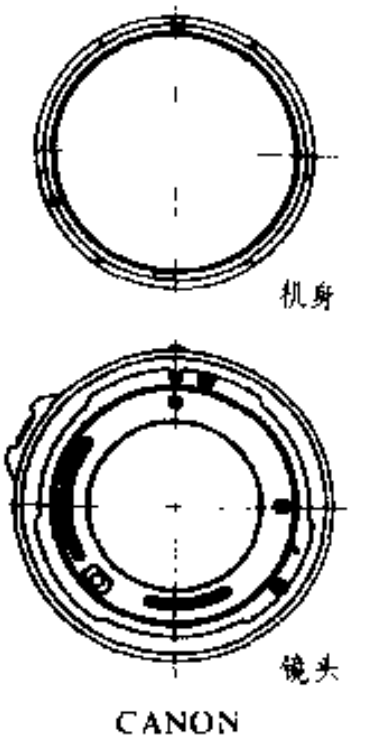


图 3—78 照相机的锁环式联接装置

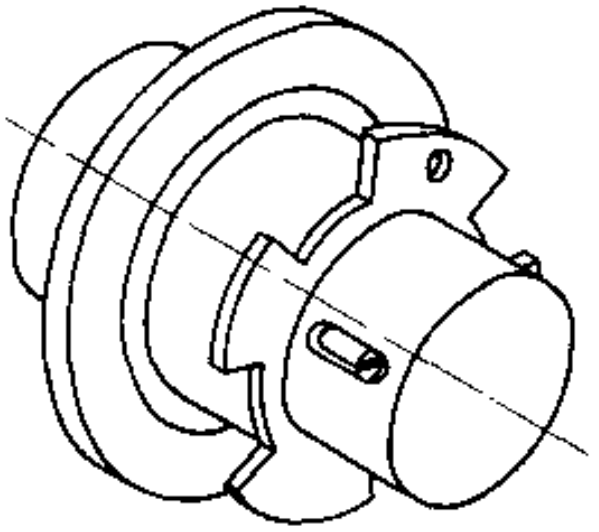


图 3—79 电影摄影机的锁环式联接装置

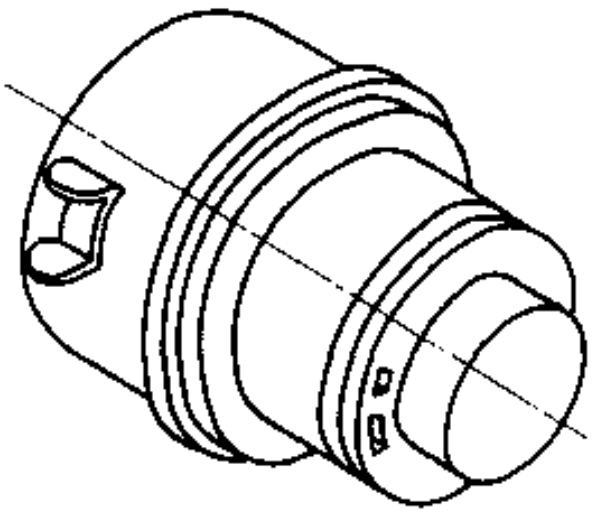


图 3—80 和平 S—35Ⅱ型摄影机用镜头

5. 螺纹式：在机身镜头座孔中有内螺纹，摄影镜头后端有外螺纹。安装摄影镜头时，应使外螺纹与内螺纹彼此对正，然后正转摄影镜头，把外螺纹旋入内螺纹中，直至终点，就可把摄影镜头拧牢在机身上。早期 135 照相机多采用 M39×1 规格的螺纹

（由莱卡照相机首先采用），为提高摄影镜头的最大相对孔径，后来世界各国普遍采用 M42×1[①] 规格的螺纹（由康太克斯 S 型照相机首先采用）。此类联接机构在结构上加工容易，又具有一定强度、精度和寿命，但装卸较费事，长期使用后精度易因磨损而降低。因此目前在 135 照相机领域已基本被淘汰。

在 16 毫米电影摄影机上，目前世界各国普遍采用的“C”型镜头座即为螺纹式结构，其尺寸规格为：外径 1 英寸、每英寸 32 牙的英制螺纹（国产红旗 S-16 型和海鸥 S-16B 型 16 毫米电影摄影机即采用此规格）。

目前，世界各国照相机和电影摄影机生产厂家，尽管多数采用卡口式和锁环式联接结构，但不同厂家产品的结构形状和尺寸（如卡爪的个数和分布，每个卡爪的弧长、卡爪外圆周的直径、摄影镜头的像面定位距等）一般并不相等，因而给彼此的互换带来一定困难（参阅图 3—76 至图 3—79 所示形状尺寸的差异）。甚至同一厂家过去生产的摄影镜头与目前生产的摄影镜头之间，也因联接结构不同而不能互换。如潘太克斯厂过去生产的 SPF 型 135 照相机采用的是 ES 型螺纹镜头座，而目前生产的 LX 型、超 A 型等 135 照相机采用的均为 K 型卡口镜头座。又如阿里弗莱克斯 35 毫米电影摄影机，早期采用锁舌式镜头座，后改为钢质刺刀型卡口式镜头座，目前又改为 PL 型锁环式镜头座。因此，在单独购买摄影镜头时，请务必注明镜头座的型号，以免厂家凭他们的习惯发货，以至与自己期望不符而无法直接使用。当然，也有的厂家为协同竞争而放弃专利，从而使众多厂家采用与其相同的联接结构（如潘太克斯研制的 K 型卡口镜头座已被很多厂家共同采用了）。一些专业光学公司为扩大销路，往往使同一性能

① M42×1：M 表示为公制螺纹，螺纹外径为 42 毫米，螺距为 1 毫米，俗称 P 型镜头座；M39×1 类推。

参数的摄影镜头备有多种可卸联接环，以供摄影者随意选择，如腾龙镜头的百搭（Adaptall）接环。

常见135MF单镜头反光照相机镜头座的型号，及不同牌子摄影镜头的互换性能，如表3—17所示。

表3—17　　常见135MF单镜头反光照相机与摄影镜头的联接结构型号与互换性

照相机名称	原厂镜头名称	镜头座型号
潘太克斯(PENTAX)	PENTAX	P/K、PK、K
理光(RICOH)	RIKENON	
启侬(CHINON)	CHINON	
考西娜(COSINA)	COSINON	
米兰达(MIRANDA)	MIRANDA	
西姆柯(CIMKO)	CIMKO	
西格玛(SIGMA)	SIGMA	
凤凰(PHOENIX)JG303M	凤凰	
珠江(PEARLRIVER)S-207	珠江	
美能达(MINOLTA) 海鸥(SEAGULL) 孔雀(PEAFOWL)	MINOLTA MD 海鸥 孔雀	M/MD、MD
珠江(PEARL RIVER)S-201	珠江	类似M/MD (虽能装上M/MD镜头但无法将其锁牢)
康太克斯(CONTAX) 雅西卡(YASHICA)	CARL ZEISS YASHICA ML	C/Y、Y/CX
尼康(NIKON)	NIKKOR	N/AI、AI
佳能(CANON)	CANON FD	C/FD、FD
奥林巴斯(OLYMPUS)	OLYMPUS ZUIKO	OM
玛米亚(MAMIYA)	MAMIYA SEKOR	MAMIYA
柯尼卡(KONICA)	KONICA HEXANON	K/AR、AR
富士卡(FUJICA)	FUJINON	F/AX、AX
罗莱弗莱克斯(ROLLEI-FLEX)	ROLLEI	ROLLEI
托普康(TOPCON)	TOPCON	TOPCON
普拉蒂卡(PRAKTICA)	PENTACON	PENTACON(卡口)(早期为螺口M42×1)

此外，随着技术的进步，照相机功能的增多，各照相机厂均在不断发展、改进和完善着各自的镜头座结构，从而在同一镜头座的型号中，又派生出若干种规格。例如，潘太克斯在 K 型镜头座的基础上又派生出 KA 型镜头座（在镜头座定位端面上增加了 6 个电子触点，用在 P30 型、P50 型、A3 型 135 单镜头反光照相机上）。又如，尼康在 AI 型镜头座的基础上又派生出 AI-S 型镜头座，以使摄影镜头的自动光圈和程序曝光功能与机身正确配合（在镜头座定位端面右上方增加了一弹性销钉，用在 FA 型 135 照相机上）。再如，美能达为自动调焦功能而生产出 MAF 型卡口座，康太克斯为增加程序曝光功能而在 C/Y 座上增加了一联接装置（用于 159 型 135 照相机上）。理光在 K 型座的基础上派生出 RK 型座。

总之，凡改进型一般新旧镜头不可互换，凡派生型一般旧镜头均可装在新机身上，且除不具备程序曝光等新功能外，仍能进行一般摄影。

展望未来，带电子触点的镜头座将会得到普遍采用。

某些照相机的摄影镜头虽可安装到其它厂家的照相机上，但摄影者在研究透两种照相机的异同之前，请勿冒然互换，以免发生意外。例如，有人将卓尔基（Зоркий）Ⅱ型照相机镜头，安装到泽尼特（Зенит）3M 照相机上，由于上弦卷片前未预先拔出镜头，以至使反光镜升降机构损坏，而无法再取景。

目前有的照相机生产厂家为了显著降低其普及型照相机的生产成本，采用工程塑料制造照相机机身上的镜头座，以及照相机曝光窗处的胶片输片轨道（例如佳能 EOS100、300、500、1000 等几型照相机）。但是，由于塑料的硬度与耐磨性能远远不如钢材，故此这类照相机不宜过于频繁地装卸摄影镜头，以免因塑料镜头座的磨损引起该照相机机身像面定位距精度的下降，从而导致所摄影像清晰度的降低。

单镜头反光取景照相机的摄影镜头后端，一般都有一自缩光圈杆，该杆后端与机身镜头座内的控制拨杆相配合，该杆前端与摄影镜头内的自缩光圈机构相联接。自缩光圈杆按工作原理分有拨动式（如凤凰 303K 型照相机）与推进式（如阿莱弗莱克斯 16SR 型 16 毫米电影摄影机）两种型式。

二、镜片的固定与镜头的调节

摄影镜头的内部结构非常复杂，参见图 3—81 中所示理光（RICOH）公司的理开依（Rikenon）28－100 毫米、F4P 微距摄影镜头的结构图，图 3—82 所示德国卡尔·蔡司（CARL·ZEISS）18 毫米、1:1.2 摄影镜头的结构图。

摄影镜头的像质及稳定性，除取决于光学设计和光学零件的加工精度外，还与镜头的机械结构设计和机械零件加工、装配精度高低紧密相关。

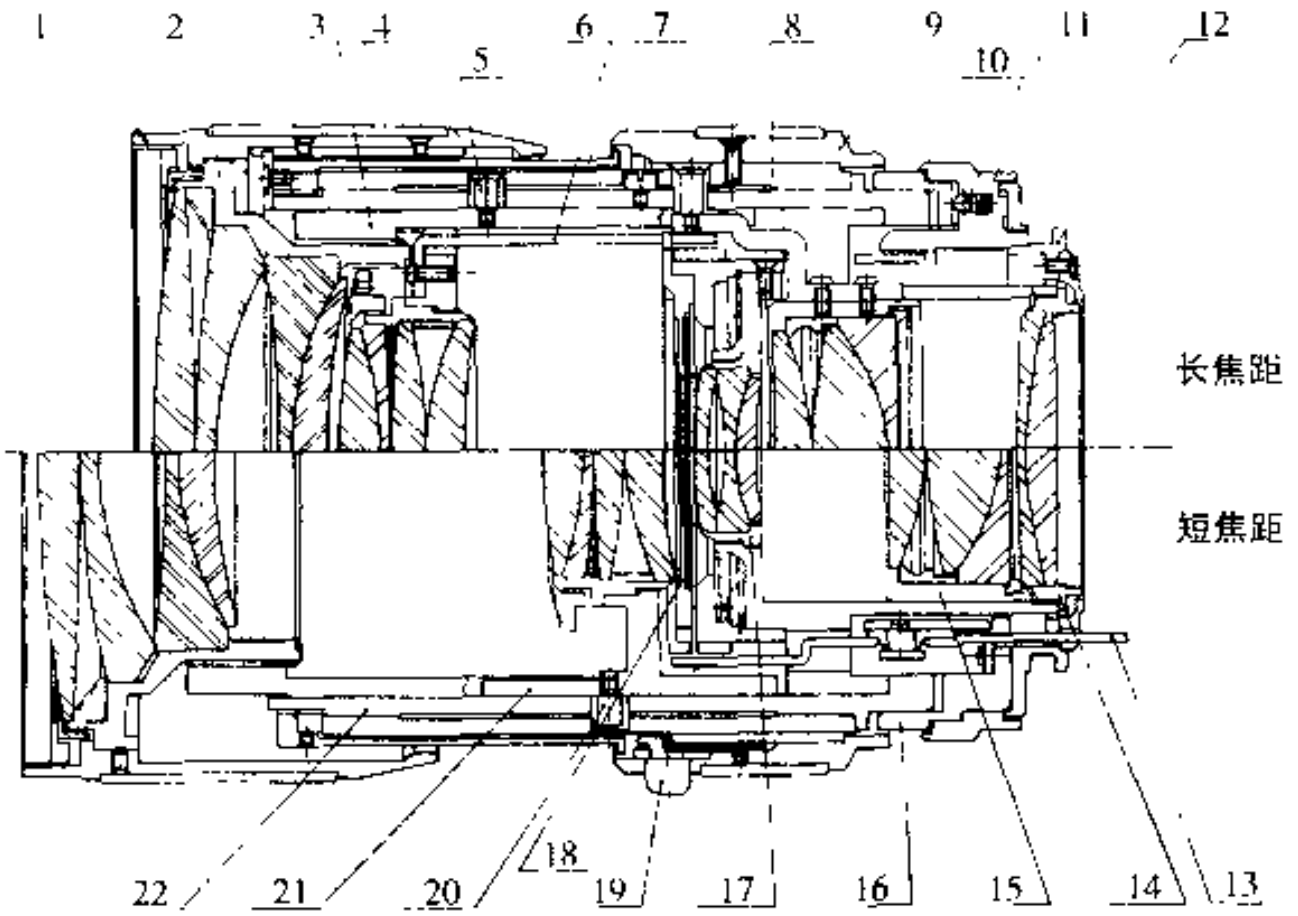
在现代专业级变焦距摄影镜头的镜筒加工技术中，由于引入了微米级（1/1000 毫米级）加工精度的数字控制加工系统，对控制摄影镜头中各透镜群前后移动的空间凸轮进行超精密加工，从而使得变焦距摄影镜头的成像性能产生了质的飞跃。

摄影镜头的机械结构主要包括镜筒、调节机构与控制机构三大部分。

镜筒的作用主要有四点：固定和支承各光学镜片，使之既保持彼此轴心重合，又保持彼此间的设计间距；支承各调节机构；防止灰尘等进入镜头内部，以免内部镜片脏污和损伤；吸收杂光。

为了既轻便、又耐用，摄影镜头的镜筒一般采用合金铝制成（早期产品有用铜制成的）。目前有的厂家为下降成本，将镜筒上的部分零件改用塑料制成，甚至有的厂家在生产低档摄影镜头的

镜筒和各调节环时，几乎全部用塑料取代。因塑料易受温度等影响而改变尺寸，故高档摄影镜头极少采用。



1. 滤光镜螺纹　2. 固定第一透镜群的镜筒　3. 第一透镜群的移动镜筒　4. 调焦环　5. 控制第一透镜群移动的滚销　6. 补偿杆　7. 基线镜筒Ⅱ　8. 空间凸轮镜筒　9. 变焦环　10. 限位销　11. 光圈标尺环　12. 镜头卡口　13. 自动光圈杆　14. 固定第五透镜群的镜筒　15. 第四透镜群的移动镜筒　16. 基线镜筒Ⅰ　17. 固定第三透镜群的镜筒　18. 光圈叶片　19. 微距转换钮　20. 控制第二透镜群移动的滚销　21. 第二透镜群的移动镜筒　22. 主镜筒

图 3—81　理光摄影镜头的结构图

各光学镜片在镜筒上的固定方法主要有下列四种：用带螺纹的压圈压紧（多适于对透镜向外凸的侧面进行压紧），对透镜座外端辊边使其包紧镜片（多适于对透镜向里凹的侧面进行辊边）、用隔离环将两镜片限定在确定间距上、用弹性钢丝涨圈将镜片卡

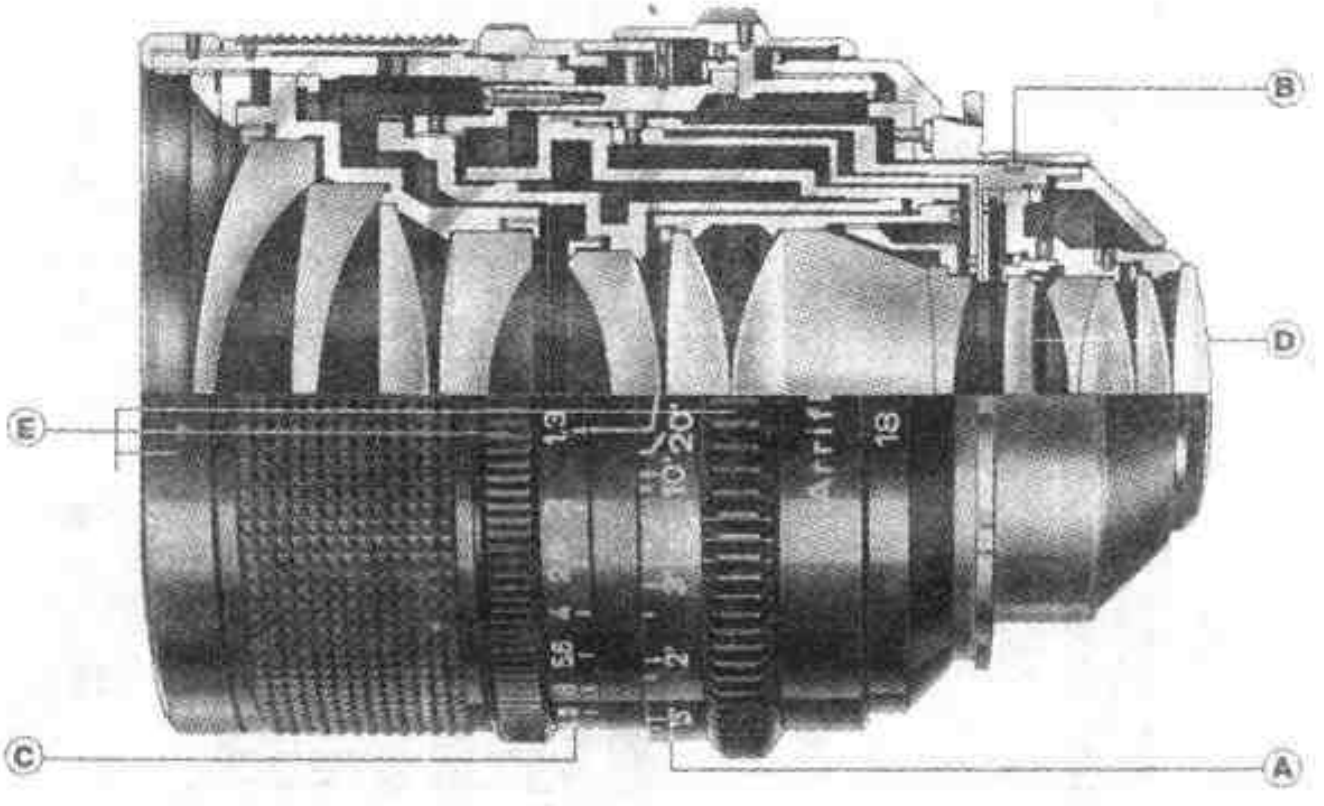


图 3—82 蔡司摄影镜头的结构图

牢在透镜座上。相比之下，第四种方法仅用于简易摄影镜头上，而辊边法对维修将带来一定困难。

为保证各组镜片之间的间距精度，镜筒在结构上分为三类：调整型镜筒（有专门调整环）、选配型镜筒（装配时根据检测结果挑选彼此配合的零件）、互换型镜筒（镜筒上各零件可随意彼此互换）。相比之下后者精度较低，多用于一般或简易摄影镜头上。

某些摄影镜头出厂时在第一片透镜前方专门设有保护镜片，以求使某些全天候照相机的防水密封性能更好，或保护采用硬度较软之萤石玻璃制造的第一片透镜免遭划伤（后者多为大孔径超长焦距的摄影镜头，其第一片透镜的直径太大，极易划伤），如佳能 EF1200 毫米、F5·6L 摄影镜头。

镜筒的最前端，一般具有安装滤光镜等光学附件的结构——多数为螺纹结构，使用时只需把欲用光学附件拧在摄影镜头前端

即可；也有的镜头前端采用卡口式结构（如罗莱弗莱克斯 SL66 型、哈苏 500C/M 型 120 照相机的摄影镜头）。相比之下卡口式结构使附件的装卸简便迅速，有利于抓拍，但制造成本略大。

罗莱弗莱克斯 SL66 型 120 照相机所配备的摄影镜头，由于镜头前端的卡口与镜头后端的卡口尺寸完全一样，故此该镜头前端的卡口除可供安置相应的卡口滤光镜外，还可供把该镜头前后颠倒后倒装在机身上，以便进行近摄（参见作者所著《中外照相机博览》一书中第二部分第二节所示）。

德国产罗敦司特（RODENSTOCK）牌 MAKRO—SIRONAR 摄影镜头具将前、后镜筒位置互换（参见第四章第三节十四中的关内容）——有倒装使用的功能。

有的摄影镜头在镜筒后端安装滤光镜（如图 3—83 所示），也有的摄影镜头在镜筒内部装置滤光镜（如图 4—3 所示），还有的摄影镜头在镜筒上有安装滤光镜插框的隙缝（如柯克 5 倍变焦距镜头，在不使用滤光镜时应将空插框插入镜筒上的隙缝中，以防漏光）。

摄影镜头的镜筒一般又由主镜筒、固定透镜群的镜筒、移动透镜群的镜筒、外镜筒、联接筒、镜头后联接环、外装饰革等等几部分共同组成。

摄影镜头的调节机构主要有：光圈调节机构、调焦机构、变焦机构、镜间快门调节机构等。

光圈调节机构的工作原理如下：转动光圈调节环时，曲线（或直线）槽通过滑动销钉，拨动各片光圈叶片同步回转，从而改变各叶片所共同组成之光孔的大小。如图 3—84 所示。

在单镜头反光照相机用摄影镜头上，一般还有自缩光圈机构，其作用如下：在平时，使摄影镜头的光圈始终处于全开状态下（某些 120 单镜头反光照相机的摄影镜头需经上弦后光圈才开至最大），以使取景器内的影像特别明亮，从而有利于摄影者更

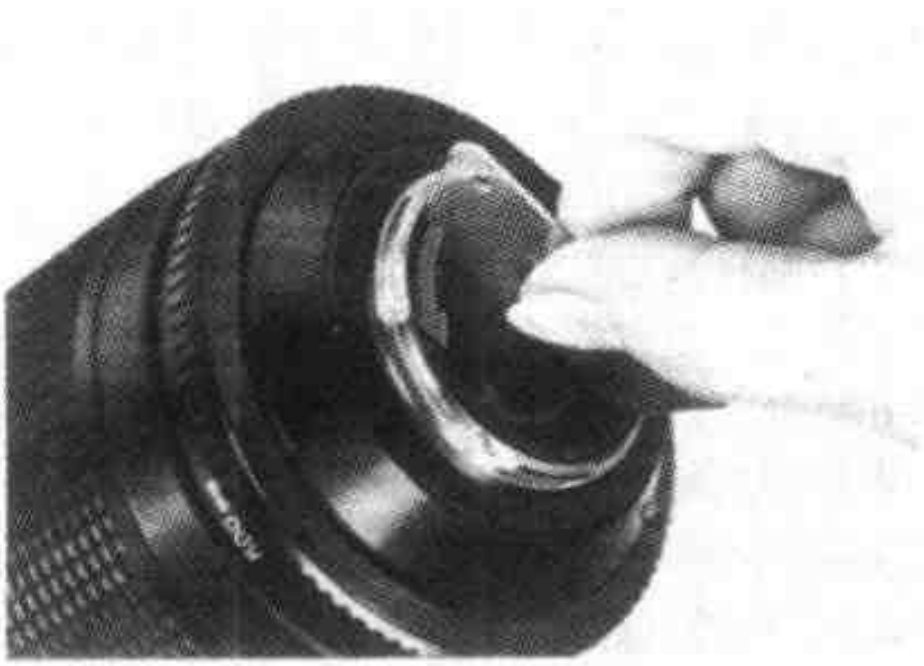
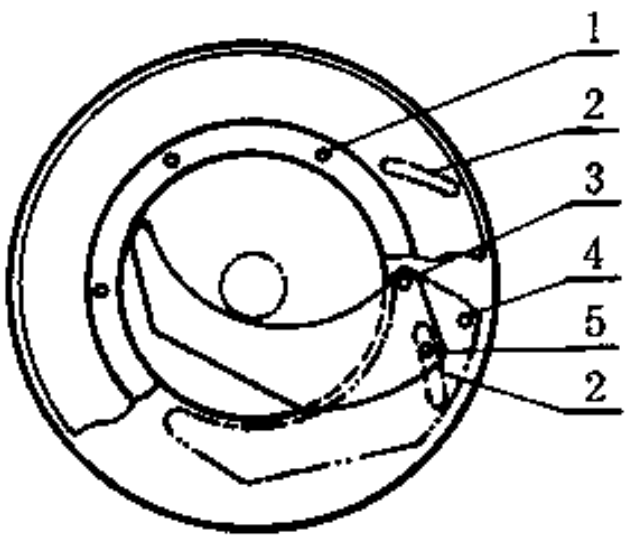


图 3—83

精确地进行调焦和取景；在曝光前的一瞬间，又可自动迅速使光圈缩至所预选的光圈系数状态，以利实现正确曝光。

有的摄影镜头具有自动光圈功能，它可根据被摄景物亮度的改变，自动调节光圈的大小。

调焦机构主要有下列几种：



1. 固定销孔　2. 曲线槽　3. 固定销钉 a　4. 滑动销钉 b　5. 滑动销钉 b′

图 3—84　光圈调节机构（六叶片式等分刻度光圈）

1. 导轨式：调焦时，调焦钮通过齿轮、齿条机构使整个镜

头座板或曝光窗板沿导轨前后平移。主要用于大型专业照相机上。此机构一般与伸缩皮腔配合工作。

2. 外凸轮式：调焦时，调焦钮通过镜筒外的凸轮，带动整个镜头座板前后移动。如海鸥 4A、4B 型 120 照相机。

3. 内凸轮式：调焦时，转动镜筒上的调焦环，可通过镜筒内部的凸轮，带动部分透镜组前后移动完成调焦。多用于长焦距摄影镜头及单镜头反光照相的自动调焦（AF）摄影镜头上。

4. 多头螺纹式：调焦时，转动镜筒上的调焦环，可通过镜筒上的多头螺纹，带动全部透镜组同步前后平移或旋转着前后移动（后者为早期产品）。此种机构目前应用得最为广泛。例如 ACCESS 变焦距摄影镜的调焦机构为 6 头螺纹，微距机构为 16 头螺纹。

5. 单头螺纹式：调焦时，转动镜筒上的调焦环，可通过镜筒上的单头螺纹，带动部分透镜组旋转着前后移动。多用于简易摄影镜头上（如某些儿童玩具照相机上），以及部分变焦距摄影镜头上。

变焦机构一般是通过镜筒上的空间凸轮，控制变焦群与补偿群的前后移动，以实现改变焦距的目的（参见图 4—10 所示）。

控制机构主要有：自缩光圈拨杆、镜间快门上弦杆、镜间快门释放杆等。

思　考　题

1. 阐述下列定义：标称焦距、像面定位距、后顶焦距、像角、相对孔径、最大相对孔径、F 数、T 数、调焦、调焦距离、内调焦、调焦补偿组元、六种像差、分辨率、明锐度、MTF、杂光、眩光、镀膜、彩色贡献？
2. F 制光圈数的标准系列与各挡光圈之间的曝光关系？光圈差 1/3 级时在数值上的区别？

3. 常见调焦方式有哪些？

4. 常见像差的种类有哪些？收小光圈可以降低哪些像差？何谓最什光圈？如何根据 MTF 曲线形状判断摄影镜头品质的相对高低？

5. 镀膜的意义、种类与判断方法？

6. 摄影镜头之像场照度的特点如何？

第四章　摄影镜头的种类与特点

摄影镜头的种类繁多。依据焦距值能否调节，可将摄影镜头分为定焦距摄影镜头与变焦距摄影镜头两大类；依据用途又可将摄影镜头分为普通摄影镜头与特殊摄影镜头两大类。

第一节　定焦距摄影镜头的种类与特点

定焦距摄影镜头指焦距固定不变的摄影镜头。

根据焦距的长短，可将拍摄同尺寸画幅的定焦距摄影镜头分为鱼眼摄影镜头、短焦距摄影镜头、标准摄影镜头、长焦距摄影镜头四类。焦距的长短划分并不以焦距的绝对值为首要标准，而以像角的大小为主要区分依据。故所摄画幅大小不等时，其标准镜头的焦距大小也就不同。

一、鱼眼摄影镜头（Fish-Eye）

鱼眼摄影镜头前端第一片透镜的前表面，向前明显凸起，第一片透镜的前顶点远远高出镜筒，好似鼓起的金鱼眼。如图 4—1 所示。

由第一章第一节知，水的折射率比空气大，当光线通过空气与水之间的界面时，将产生折射，以至使水中的鱼可看到空气中 180°空间角内的全部景物，即鱼眼睛在空气中的视角可达 180°。鱼眼摄影镜头有象鱼那样的广阔视角——可达 180°，有的甚至达到 230°，因而能拍摄下照相机两侧的部分景物。为此，鱼眼镜头第一片透镜的直径很大。

鱼眼摄影镜头的焦距很短。在 135 照相机系列中，鱼眼摄影

图 4—1 鱼眼镜头外形

镜头的焦距范围一般为 6mm 至 16mm。

鱼眼摄影镜头的像场照度比较均匀，但存在着严重的畸变像差，影像的失真比任何摄影镜头都大。

鱼眼摄影镜头按其设计原理不同而分为三类：等距投影型、正投影型、等立体角投影型。目前出售的鱼眼摄影镜头绝大部分属于等距投影型鱼眼摄影镜头。

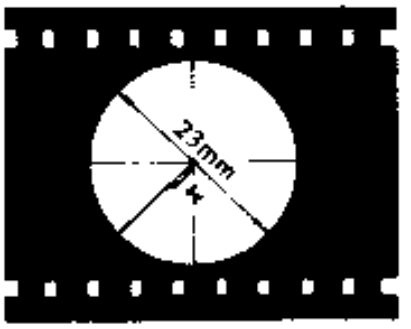
用鱼眼镜头摄影时，景物空间中位于摄影镜头光轴上的物点，其对应的像点必位于像场中心处，即位于照片中心处。自被摄景物空间中任一物点至摄影镜头物方节点间的连线与摄影镜头光轴的夹角，称作该物点的天顶角 θ。该物点所对应的像点与照片中心的距离为 x。

等距投影型鱼眼摄影镜头的特点如下：任一物点所对应之像点至照片中心的距离 x，与该物点的天顶角 θ 成正比关系：

$$x = C \cdot \theta \qquad (4—1)$$

式中 C 为常数。

见图 4—2 所示。如日本尼柯 8mm、F/2.8 鱼眼镜头。



x	θ°	Δθ°
0	0.00	
0.5	3.58	3.58
1.0	7.17	3.59
1.5	10.76	3.59
2.0	14.36	3.60
2.5	17.98	3.62
3.0	21.62	3.64
3.5	25.27	3.65
4.0	28.95	3.68
4.5	32.66	3.71
5.0	36.40	3.74
5.5	40.17	3.77
6.0	43.98	3.81
6.5	47.83	3.85
7.0	51.73	3.90
7.5	55.67	3.94
8.0	59.67	4.00
8.5	63.72	4.05
9.0	67.84	4.12
9.5	72.03	4.19
10.0	76.31	4.28
10.5	80.69	4.38
11.0	85.21	4.52
11.5	89.97	4.76

θ：天顶角

x：自画幅中心至象点的距离

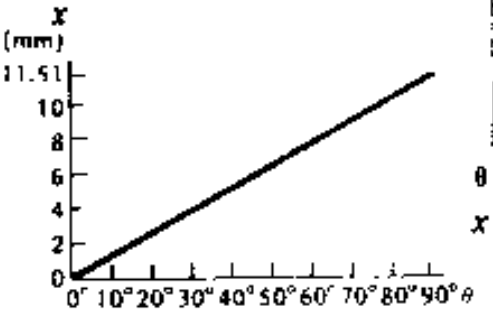


图 4—2　等距投影型鱼眼睛镜头

例如某等距投影型鱼眼摄影镜头的视角为 180°（亦即景物空间与摄影镜头光轴成 90°天顶角之内的景物均可被拍摄到照片上），像场半径之 1/2 处的影像所对应的物体必位于景物空间 45°天顶角处。

等距投影型鱼眼镜头像场边缘仍存在像场照度略降低的现象。

正投影型鱼眼摄影镜头的特点如下：任一物点所对应之像点至照片中心的距离 x，与该物点天顶角 θ 的正弦成正比关系：

$$x = C \cdot \sin\theta \qquad (4—2)$$

式中 C 为常数。

正投影型鱼眼摄影镜头的像场照度非常均匀，因而对测量天空光的亮度分布，以及测量被摄景物中某区域的亮度、辐射热等

时极为有利。日本尼柯 10mm、1:5.6 OP 鱼眼摄影镜头即属于正投影型。

等距投影型鱼眼摄影镜头主要有两种形式：一种为圆画幅式鱼眼摄影镜头，它的最大像场比照相机曝光窗小，并且是圆形，其水平视角与垂直视角相等，这类镜头又称**圆画幅式鱼眼镜头**（其所摄画面效果见作者著《摄影镜头的使用技巧》一书封面照片所示）；另一种为矩形画幅式鱼眼摄影镜头，它的最大像场比照相机曝光窗大，其对角线视角为 180°，显然其水平视角和垂直视角不等，且均小于 180°，故这类镜头又称**对角线式鱼眼镜头**（其所摄画面效果见作者著《摄影镜头的使用技巧》一书图 5—4 中所示）。相比之下，矩形画幅式鱼眼摄影镜头的焦距一般比圆画幅式鱼眼摄影镜头的焦距略大。由于矩形画幅式鱼眼摄影镜头可使影像充满整个曝光窗，所以可充分利用画面，如尼柯焦距 16mm、1:2.8 的鱼眼摄影镜头。

鱼眼摄影镜头按有无调焦环可分为普通调焦型与预调焦型两种类型。其中普通调焦型有调焦环，可以根据拍摄时被摄主体的具体距离远近，进行相应的调焦；而预调焦型鱼眼摄影镜头在出厂前，已预先将摄影镜头调至某距离处（如 0.5 米处），并固定死，故此摄影镜头上无调焦环，也无法调焦，属于早期鱼眼摄影镜头（由于这类镜头焦距很短，景深很大，故只要拍摄距离不过于近，一般并不影响拍摄效果）。

新型鱼眼镜头（如尼柯 6mm、1:2.8、$\theta = 220°$，8mm、1:2.8、$\theta = 180°$），在安装到单镜头反光照相机上后，仍可通过摄影镜头和反光镜、屋脊五棱镜进行直接取景和进行 TTL 测光，并且摄影时具有自动收缩光圈功能。而旧式鱼眼摄影镜头（如尼柯 6mm、1:5.6、$\theta = 220°$，10mm、1:5.6、$\theta = 180°$）在往照相机上安装时，因镜头后端伸入机身的部分很长，几乎贴近曝光窗处，故在安装前需先将单镜头反光照相机的反光镜预先升起并锁住，因

而这类镜头无法进行单镜头反光取景、验证调焦，有些甚至不能进行 TTL 测光，此时可依靠专用旁轴取景器辅助取景构图（一般也只能对 160°范围内的景物取景）。

由于鱼眼摄影镜头的第一片透镜呈圆球形高出镜筒，且直径很大，因而它一般采用内置方式（Bulit－in）安装滤光镜。例如日本佳能（Canon）7.5mm、1∶5.6 的鱼眼摄影镜头（为圆画幅式，像场直径为 23mm、视角为 180°），摄影时为使所需内置滤光镜转至摄影光路中，需先按下位于镜头后部的滤光镜选择锁钮，然后才可左右转动滤光镜选择环；转动该环时共有 SKY、Y_3、O_1、R_1、CCA_4、CCB_4 六种滤光镜可供选择，（如图 4—3a 所示）。又如佳能 FD15mm、1∶2.8 鱼眼摄影镜头（为矩形画幅式，对角线视角为 180°），为把所需内置滤光镜转至摄影光路中，需先将位于镜头前端的滤光镜选择环向镜筒后方推到底，尔后才可使其左右转动；该环上共有 SKY、Y_3、O_1、R_1 四挡滤光镜可调，（如图 4—3b 所示）。再如尼柯 8mm、1∶2.8 鱼眼摄影镜头（为圆画幅式，像场直径为 23mm，视角为 180°），只需直接拨动位于镜头后部外圆周上的选择盘至定位处，就可先后将 L1BC、Y_{48}、Y_{52}、$O_{56}R_{60}$

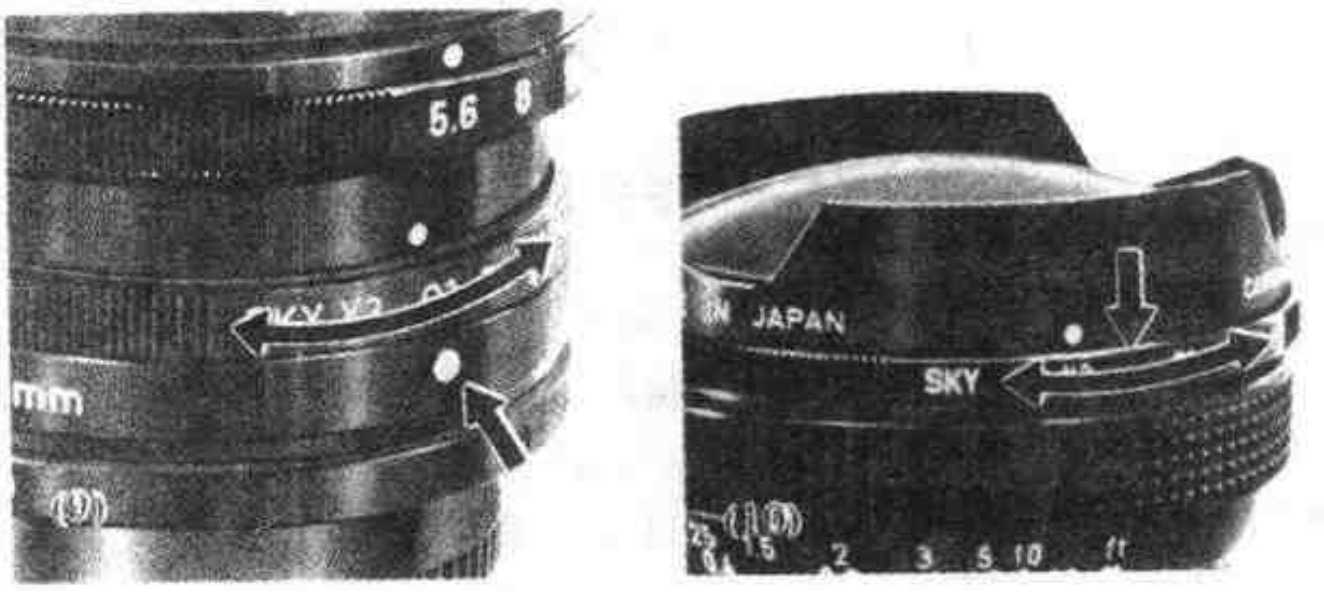


图 4—3　鱼眼镜头的内置滤光镜

五种内置滤光镜拨至摄影光路中。

由于鱼眼摄影镜头第一片透镜的直径很大，又高高向前凸起，因而给维护工作带来一定困难。摄影者务必十分精心操作，提高警惕，勿在无意中碰触到镜片。

使用鱼眼摄影镜头拍摄时应注意以下几点：选择内置滤光镜时务必应转至定位处，勿转至两挡之间使用；注意勿误将照相机三脚架或摄影者的脚等摄入画面，以免有损画面构图。

有一种球幕电影，观众观看时身临其境感非常强烈。这种电影就是用鱼眼摄影镜头拍摄，并用鱼眼放映镜头放映的。

二、短焦距摄影镜头（WIDE－ANGLE）

焦距比标准摄影镜头短，同时又比鱼眼摄影镜头长的摄影镜头，称为**短焦距摄影镜头**。此类镜头又细分为**超广角摄影镜头**（Super Wide Angle，Ultra Wide Angle）和**普通广角摄影镜头**（Wide Angle）二类。其中前者的焦距接近鱼眼摄影镜头，后者的焦距接近标准镜头。例如，在135照相机的摄影镜头系列中，一般把焦距自17毫米至21毫米的镜头（即视角大于90°的非鱼眼镜头），称为超广角摄影镜头（目前日本尼康公司生产出了焦距13毫米、1:5.6、视角118°的超广角摄影镜头）；把焦距等于或大于24毫米、而又比标准镜头焦距短的摄影镜头，称为普通广角摄影镜头。参见图4—4所示。

短焦距摄影镜头的最近调焦距离一般比其它镜头近得多，例如可近至0.25米至0.3米处拍摄。短焦距摄影镜头的最大相对孔径，介于标准镜头与长焦距镜头之间，因此较大。短焦距摄影镜头的光圈数，一般难于做得很小，通常为F16，很少有F22、F32诸挡。

a. 超广角镜头

b. 普通广角镜头

图 4—4　短焦距摄影镜头

超广角镜头与鱼眼镜头的最大区别，除了焦距的长短、视角的大小外，尚有画面畸变的校正程度，前者有意进行了校正，以尽量使畸变像差有所降低，而后者保留了畸变像差，未予校正。

短焦距摄影镜头像场边缘的照度较低。选购短焦距摄影镜头时，应注意检验其所结成的影像，是否存在画面中心明亮，四角过于暗的明显缺陷。

国外生产的袖珍式旁轴取景 135 照相机，一般安装的就是焦距 35 毫米左右的普通广角摄影镜头，以便可在较近距离处摄下更大范围与较大景深的景物，从而有利于初学者摄下所希望的带背景的纪念照片。

单镜头反光照相机的短焦距镜头一般采用反摄远型结构，故其体积比标准镜头大，长度也较长。

三、标准摄影镜头（STANDARD、NORMAL）

标准摄影镜头的焦距、视角等均较适中。其所摄画面中景物之间所呈现出的透视关系，与人眼视觉所感觉到的透视关系非常相似，故自然、逼真再现性强。

标准摄影镜头的像差一般较易校正，所以其成像质量一般比同档次的其它镜头好，且最大相对孔径易于制做得较大，从而对低照度下摄影非常有利。在单镜头反光照相机的全部摄影镜头中，标准镜头的体积最小，故易于携带。参见图 4—5 所示。

在我国，标准摄影镜头与机身一般是作为一个整体一同出售的，在国外，一般既可单买机身或单买镜头，也可随意选配镜头与机身。

国外生产的单镜头反光照相机，往往有几种规格的标准摄影镜头，以供摄影者随意选择。例如，日本产潘太克斯 LX 型 135 单镜头反光照相机，其 50 毫米焦距的标准摄影镜头，共有 1:1.2（六组七片式）、1:1.4（六组七片式）、1:1.7（五组六片式）1:2（五组五片式）四种，可任意选购，但其中最大相对孔径愈大者，价格愈贵。

图 4—5　标准摄影镜头

四、长焦距摄影镜头（TELEPHOTO）

焦距比标准摄影镜头长的摄影镜头，称为长焦距摄影镜头。此类摄影镜头按焦距长短，一般又细分为普通摄远镜头（Telephoto）和超摄远镜头（Super Telephoto、Ultra Telephoto）两类。其中前者的焦距较接近标准摄影镜头，后者的焦距远大于标准摄影镜头。例如，在 135 单镜头反光照相机的摄影镜头系列中，一般把焦距自 85 毫米至 300 毫米的摄影镜头称为普通摄远镜头，把焦距自 300 毫米至 2000 毫米的摄影镜头称为超摄远镜头（也有人把供 135 照相机用之 85 毫米至 135 毫米焦距的摄影镜头称为中摄远镜头或中焦镜头）。

长焦距摄影镜头按结构类型，还可细分为下列两大类：折射型长焦距摄影镜头（如图 4—6a 所示），折反射型长焦距摄影镜头（Reflex），后者仅采用在部分焦距自 400 毫米至 2000 毫米的摄影镜头上，如图 4—6b 所示（详见第五章第五节一中有关内容。

折射式长焦距摄影镜头的外形特点是细长，此类产品最多、

a. 折射式

b. 折反射式

图 4—6 长焦距摄影镜头

最普遍。折反式长焦距摄影镜头的外形特点是短粗，第一片透镜的中央不透光，镜头中无光圈叶片，成像光线在前进过程中不但有折射，而且有反射。

长焦距摄影镜头的视角较窄，故此拍摄时摄影镜头的轻微抖动（例如由于风的吹拂或手持照相机所产生的手抖现象），对所摄影像清晰度的影响非常明显。为此当使用长焦距摄影镜头拍摄时，要求必须先将摄影镜头与照相机或摄影机稳妥地安装在高品质的三脚架上，尔后再拍摄，以免所摄影像发虚。

长焦距摄影镜头的体积远较标准镜头大——既比标准镜头

长、又比标准镜头粗，故较笨重。其中超摄远镜头由于体积过大而不便携带，价格昂贵，并且应用机率远不如普通摄远镜头多。例如国产长城牌 2 米焦距摄影的镜头重量高达 35kg。

由于长焦距镜头焦距较长，而透镜片的直径不容易、也不宜加工得太大（若镜片直径太大，则将使镜头重量和体积增大，不易携带使用），因而长焦距摄影镜头的最大相对孔径一般较小（不难想象，若制造最大相对孔径为 1:2 的 2 米焦距摄影镜头，其第一片透镜片的直径需达 1 米以上，这对普通摄影是不现实的）。显然较小的最大相对孔径，不但对低照度条件下的摄影非常不利，而且对 35 毫米照相机的裂像式调焦验证不利，易出现一半裂像镜变黑的现象。

长焦距镜头的最小光圈一般可做得较小，达 F32 甚至 F45 以上，从而对改善景深有益。

长焦距摄影镜头的最近调焦距离一般相对较远，例如国产长城牌 2 米焦距电影摄影镜头的最近调焦距离为 40 米，亦即该长焦距摄影镜头对 40 米之内的景物根本结不成清晰影像。尼柯 2 米焦距照相用摄影镜头的最近调焦距离为 18 米。

在对摄远型、超摄远型摄影镜头进行光学设计时，一些厂家将其最佳拍摄距离设计在 51 倍焦距处，故在此距离下拍摄，可获得最佳、最出色的影像质量，反之，若在最近距离处拍摄，则一般无法获得最佳成像质量，其中画幅边缘处的影像质量所受到的影响尤为明显（也有的厂家将最佳拍摄距离设计在 26 倍焦距处）。

长焦距摄影镜头一般像场照度均匀，畸变校正得好。

近年来，由于低色散光学玻璃 ED（Extra Low Dispersion）的研制和应用成功，使长焦距摄影镜头的色差明显降低，且镜头体积和外形明显缩小，还改善了像场照度和镜头的操作性能，以至使摄影者能使用安装 600 毫米镜头的 135 照相机进行手持拍摄。

某些采用低色散玻璃的摄影镜头的镜筒上，甚至没有红外线调焦基线——当使用红外线胶片摄影时无需进行调焦补偿。

长焦距摄影镜头由于透镜片直径较大，产生杂光的可能较标准镜头略多，再加上色差等的影响，分辨率一般比同级别的标准镜头为低。此外长焦距摄影镜头一般多用于拍摄远处物体，而远处物体的清晰度因受大气状况的影响较大，故此拍摄远处景物时很难做到时时均最清晰。

第二节　变焦距摄影镜头（ZOOM）的种类和特点

焦距可以改变的摄影镜头称为变焦距摄影镜头。在变焦距摄影镜头上都有变焦环，调节该环可以使镜头的焦距值在预定范围内灵活改变。

变焦距摄影镜头最长焦距值与最短焦距值的比值，称为该镜头的变焦倍率，简称变倍率。变焦距摄影镜头还常用其变焦倍率表示。例如，法国产昂热尼厄（Angénieux，又译安琴）10×25 型变焦距电影摄影镜头，系指焦距自 25mm～250mm 的 10 倍变焦距摄影镜头。

一、变焦距摄影镜头的原理与种类

由公式（2—9）可知，当两光学系统前后叠加组合时，新组合之光学系统的焦距大小，除与两独立光学系统的各自焦距有关外，还与两者主点间距 d 的大小紧密相关。（参见第二章第一节四光学系统的组合中例 1 的计算结果）。变焦距摄影镜头正是根据上述原理，通过改变镜头内某些透镜组之间的间距，来改变整个摄影镜头焦距的。

若把变焦距摄影镜头中整个光学系统的全部透镜片从摄影成像功能上进行分类，则该变焦距光学系统可分为以下几大部分：1. **调焦群**，其作用主要供对被摄主体进行精确调焦，简称调焦组[①]；2. **变倍群**，其作用主要是按倍率改变整个变焦距光学系统的焦距，简称变倍组；3. **补偿群**，其作用主要是在改变该变焦距光学系统焦距倍率的全部过程中，恒保证该变焦距光学系统的最佳像面与感光材料平面精确吻合，简称补偿组；4. **固定群**，其主要作用是成像，在摄影过程中其前后位置基本保持不变，简称固定组，有的变焦距摄影镜头只在变焦光学系统的后部有固定群，也有的同时在变焦光学系统前、后两部各有一固定群（分别称为前固定群与后固定群，如图 0—11 与图 5—23 中的二只变焦距镜头均同时有前、后固定群）。电视变焦距摄影镜头的固定群中一般还有几片透镜可以单独进行附加运动，以使该镜头进入微距 Macro 摄影状态，参见图 4—7 中所示日本佳能电视摄像用变焦距摄影镜头的光学系统。其中 a. 图为短焦距状态，b. 图为长焦距状态。

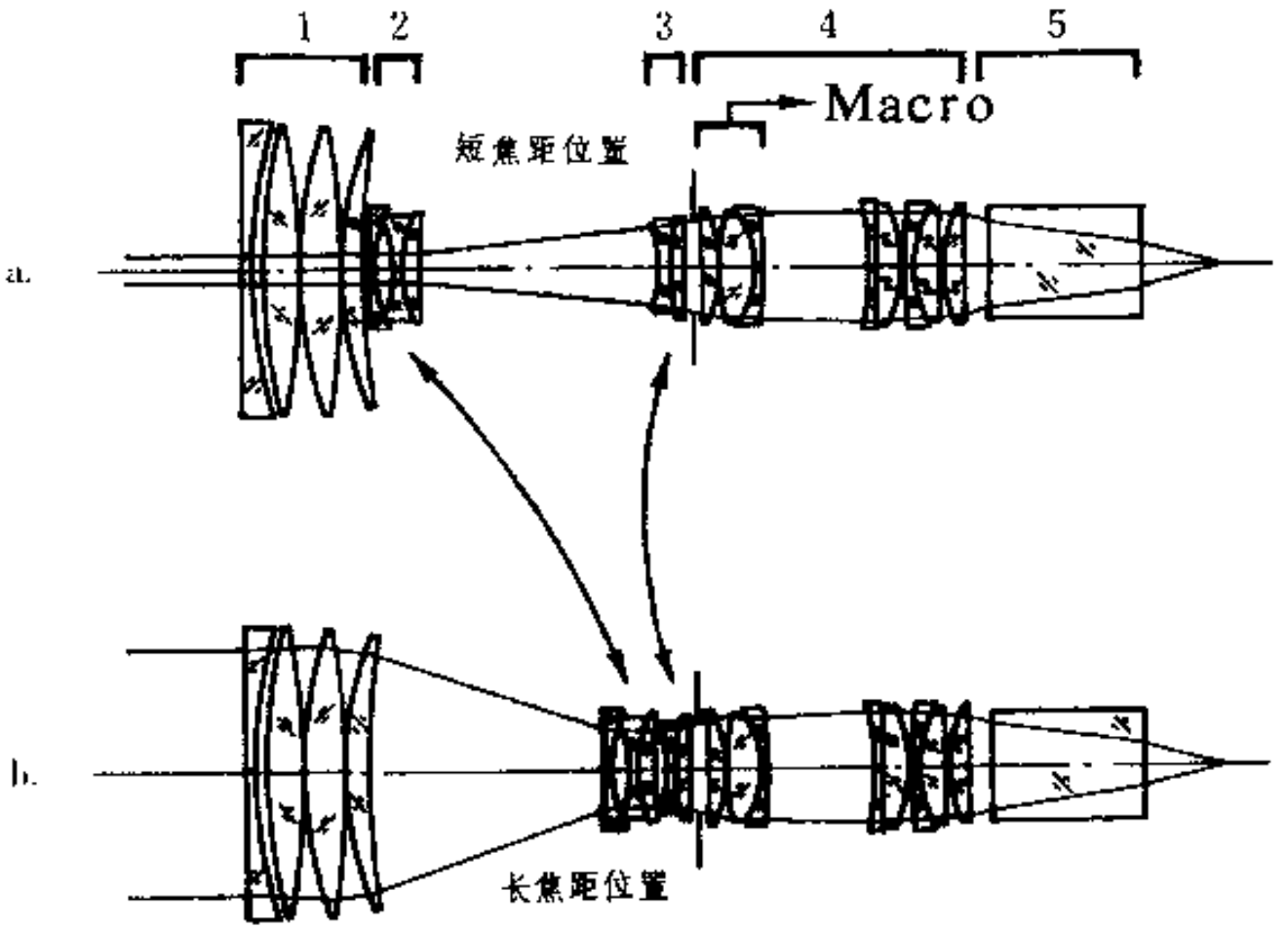
此外，有些电视摄像变焦距镜头中还设计有**内置增倍群**，当通过选择钮把该部分插入摄影光路中后，可以使该变焦距摄影镜头变焦范围内的全部焦距值，均成倍增大，简称内置增倍组。一般是使焦距增大 2 倍（2×），参见图 5—26 中所示。

当调节图 4—7 所示电视摄像用变焦距摄影镜头的变焦环至短焦距端时，变倍群远离光圈而前移至调焦群附近（如图 4—7a 中所示），此时调焦群与变倍群之间的间距最小，二者好似共同组成了一负组（发散）光学系统，而补偿群与固定群（中继组）有如共同组成了一正组（会聚）光学系统，显然前后二光学系统

---

① 此处的“组”的概念与前述研究摄影镜头构成时“几组几片”中的“组”的含义不同，此处的“组”可能包含若干个前后均为空气的胶合透镜及单片透镜。

构成了一反摄远型的摄影镜头（如图4—8a 中所示）。当调节此镜头变焦环至长焦距端时，变倍群向后移至光圈附近（如图 4—7b 中所示），于是调焦群仍为其正组（会聚）光学系统，变倍群、补偿群、后固定群三者有如共同组成了一负组（发散）光学系统，显然此时前、后二光学系统构成了一摄远型的摄影镜头（如图 4—8b 中所示）。

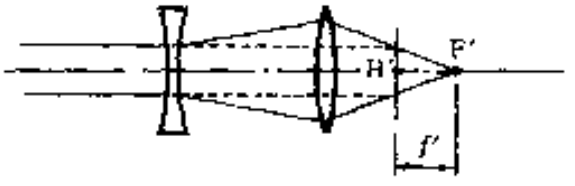


1. 调焦群　2. 变倍群　3. 补偿群
4. 固定群　5. 蓝、红、绿分光棱镜组

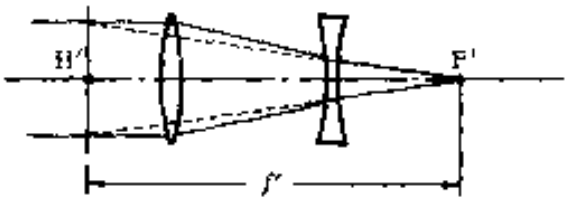
图 4—7　佳能电视变焦距摄影镜头的光学结构

由于移动透镜的位置改变焦距时，必将引起像平面的前后漂移，为了在变焦过程中使像平面恒保持稳定不动（即在变焦后不需再重新调焦，这无疑将为摄影者带来极大便利），需在变焦的同时，使另一个（或几个）透镜组产生相应的前后运动，以对像

平面的漂移进行补偿，此被调节的透镜群称为该变焦距镜头的补偿群。



a.短焦距状态(反摄远型)



b.长焦距状态(摄远型)

图 4—8　佳能电视变焦距镜头的变焦原理

根据变倍群和补偿群的性质分类，常见变焦距摄影镜头有负组变倍、正组补偿，正组变倍、负组补偿，负组变倍、负组补偿三类。参见图 4—9 中 a、b、c 三图所示。例如，国产 10×25、20×25、30×25 型及法国产昂热尼厄 10×25 型变焦距电影摄影镜头，均采用负组变倍、正组补偿；英国柯克 5×（20～100mm）变焦距电影摄影镜头、日本佳能 K-35、4.8×25 型变焦距电影摄影镜头、采用正组变倍、负组补偿；佳能电视变焦距摄影镜头（见图 4—7），采用负组变倍、负组补偿。

根据变焦距摄影镜头中补偿组的运动规律进行分类，主要有机械补偿型和光学补偿型两类。

机械补偿型主要是在变焦的同时，通过精密空间凸轮，控制补偿群进行非线性的前后移动。图 4—10 所示为佳能变焦距摄影镜头中的凸轮外形，图 a. 中 A 为控制补偿群运动之空间凸轮的精密曲线槽，B 为控制变倍群运动之空间凸轮的精密曲线槽。

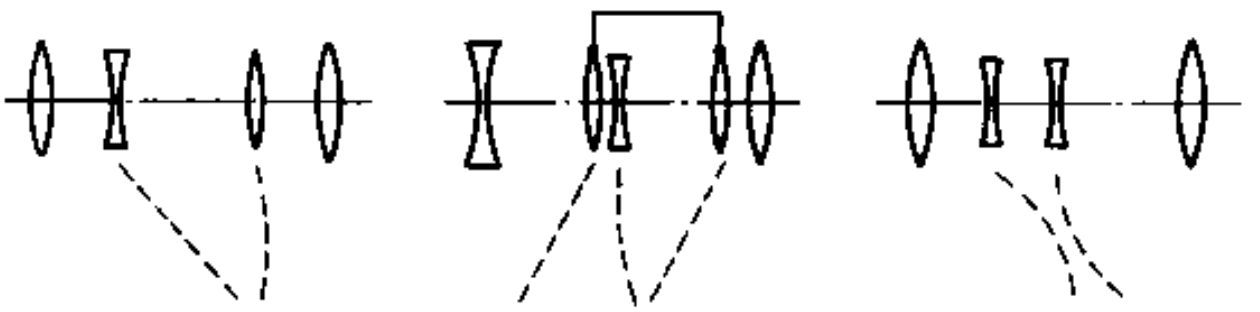
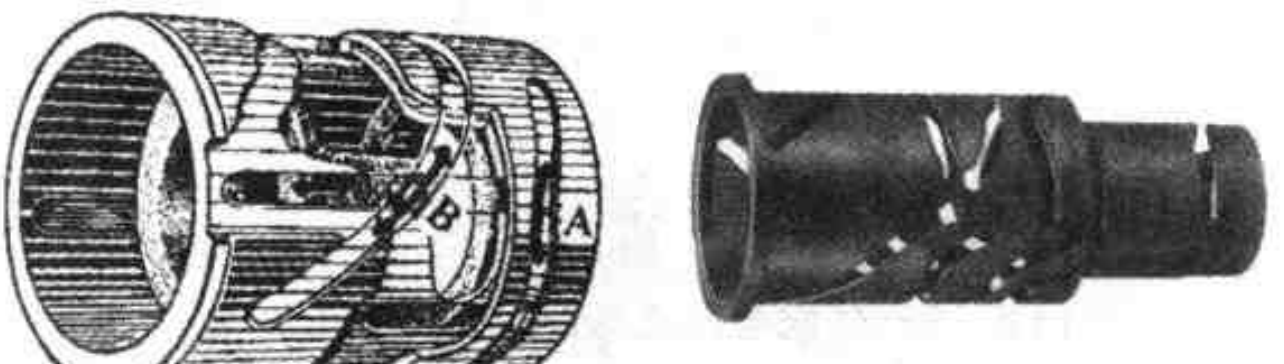


图 4—9　变焦距镜头的补偿种类



a.　　b.

图 4—10　变焦距镜头的空间凸轮

机械补偿型变焦距镜头的补偿群和变倍群一般各自通过一精密滑块，分别与补偿曲线槽和变焦曲线槽联系在一起，曲线槽与滑块之间为滑动配合。变焦时变焦环通过补偿曲线槽和变焦曲线槽，分别精确控制补偿群和变倍群，使之沿镜头光轴方向作相应的前后平移。为保证变焦距摄影镜头的成像质量，光学公司除严格控制曲线槽和滑块的形状与尺寸精度及润滑质量外，还没法抵消曲线槽与滑块间所存在的“配合间隙”，以免该间隙对透镜组的位移精度产生不良影响。抵消配合间隙的措施一般是通过拉伸弹簧拉动滑块，使该滑块始终与曲线槽的一边紧密接触，以实现机械结构上的力闭合。例如，法国产昂热尼厄 10 × 25T2 型 35 毫米电影用变焦距摄影镜头，就是采用依靠拉伸弹簧拉动补偿群的

滑块，以实现力闭合的。

在变焦距摄影镜头上，补偿空间凸轮的曲线槽一般为非线性的，变倍空间凸轮的曲线槽有线性者，也有非线性者。由于线性曲线槽的导程较长，滑块与曲线槽间的配合间隙对成像的影响较小，故一般没有抵消配合间隙的拉伸弹簧。

机械补偿型变焦距摄影镜头由于对空间凸轮的加工精度要求较高，故较难制造。目前，机械补偿型在变焦距镜头中应用最为普遍。

光学补偿型主要是通过简单的机械方法，把变倍群与补偿群联在一起，使二者保持同步运动。此类镜头的光学设计较困难，易存在较大的像面漂移，但易于加工装配，目前采用的较少。

变焦距镜头又分无级（即连续）变焦型和分挡变焦型两类，后者目前仅在一些早期产品中尚能见到。

根据变焦环的操作方式不同，可将变焦距摄影镜头分为旋转变焦式（简称旋转式）和推拉变焦式（简称推拉式）两类。

旋转式变焦距摄影镜头又称为转环式或双环式变焦距镜头。参见图 4—11a 中所示。例如，尼柯 35～70 毫米、1:3.5，佳能 FD28～50 毫米、1:3.5，潘太克斯 28～50 毫米、1:3.5～4.5 变焦距摄影镜头。此类摄影镜头的变焦环与调焦环为彼此独立的两个可转动的调节环。变焦环的外圆周上刻有变焦距标尺，镜筒上刻有“变焦基线”。变焦时需转动变焦环，使变焦标尺中所欲选的那一焦距刻线值，与镜筒上不动的变焦基线彼此对齐。由于变焦与调焦系分别操作，所以精度高，操作可靠，两者不会互相影响，而且俯、仰拍摄时变焦环也不会自行移位，并易于实现电动变焦，但手动变焦的操作复杂，比较费时、费力、繁琐，不利于抓拍。故旋转式变焦距摄影镜头非常适于电影摄影及精雕细刻式地照相摄影（如拍摄静物、广告），此外，随着内置电动变焦的推广而被大量采用在新型自动调焦（AF）摄影镜头上。

推拉式变焦距摄影镜头又称单环式变焦距镜头。参见图 4—11b 中所示。例如，尼柯 35～105 毫米、1:3.5～4.5，佳能 70～210 毫米、1:4，潘太克斯 75～150 毫米、1:4 等变焦距摄影镜头。此类摄影镜头的变焦环与调焦环彼此合二为一，称为调焦变焦环。转动该环可进行调焦，推拉该环又可进行变焦（有的向前推

a. 旋转式

b. 推拉式

图 4—11　变焦距摄影镜头

为短焦距，有的则反之）。此镜头的调焦标尺刻在调焦变焦环上，该环的后端面兼起变焦基线作用；变焦标尺、调焦基线和景深标尺均刻在镜筒上。变焦时需前后推拉调焦变焦环，使预选的那挡焦距值的刻线，刚好与该推拉环的后端面对齐。由于变焦与调焦由同一调节环控制，因而手动操作简便、迅速、快捷、省时、省事，有利于进行抓拍。但调焦与变焦易互相干扰，如调焦后再变焦时，很容易误使该环的调焦位置改变，以至使所摄影像发虚（尤其在紧张、快速地操作时）。此外，进行俯、仰方向拍摄时，易出现变焦环在本身重量作用下，自行移位的现象，甚至在曝光过程中使焦距自行改变，引起所摄影像发虚（尤其是使用时间较长的摄影镜头，严重者甚至反光镜上升时产生的震动，也会使该环移位）。推拉式变焦距镜头的体积一般较大。综上所述，推拉式变焦距摄影镜头特别适于新闻、舞台、体育等抓拍摄影。

二、变焦距摄影镜头的特点

变焦距摄影镜头的焦距值大小可连续、迅速进行改变，因而一个变焦距摄影镜头，可以兼起若干个定焦距摄影镜头的类似作用，即变焦距摄影镜头具有“一头多用”的特点，从而使用灵活、方便，便于灵活选择画面构图方式，甚至可起到定焦距摄影镜头所无法完成的特殊作用（参见作者著《摄影镜头的使用技巧》）。

变焦距摄影镜头的一头多用特点，还使得该镜头操作迅速、方便，并可节省频繁更换摄影镜头的时间，有利于进行抓拍（尤其有利于拍摄运动体）。采用变焦距摄影镜头可减少外出携带器材的数量和总体积、总重量，使携带方便，有利于外出摄影，又花钱少。

焦距的连续改变还便于摄影者在受限制的环境下从容摄影。

例如，在足球赛的实况转播过程中，摄影者通过连续变焦可以将所摄远景场面迅速推成某运动员起脚射门的中景画面。

鉴于变焦距摄影镜头的上述优点，使其近年来发展很快，尤其深受新闻、体育等专业摄影者和广大业余摄影者的青睐。

与此同时，变焦距摄影镜头也存在着一系列不足之处。

变焦距摄影镜头的最大相对孔径虽对其长焦距端而言，已设计得尚不算太小，但对其短焦距端而言，却仍显得较小。这是因为变焦距摄影镜头中的透镜片数较多，结构复杂，因而它的最大相对孔径一般很难做得更大之故（一般等于或小于1:3.5，有的虽达到1：2.8，但体积太大而不便使用，个别镜头甚至在最大相对孔径时像差明显增大，以至使所摄影像质量明显降低，画面中央与边缘的亮度相差悬殊，甚至无法正常使用）。

变焦距摄影镜头最大相对孔径较小的这一缺点，将使变焦距镜头在较暗环境下的应用受到限制。例如当景物亮度为EV7并采用50毫米焦距拍摄时，若使用F1.4的定焦距摄影镜头则可用F1.4、1/60秒进行拍摄，而若使用F4、35～105毫米的变焦距摄影镜头，则变焦至50毫米焦距挡只能用F4、1/8秒拍摄了。显然此环境下用定焦距摄影镜头时仍可手持拍摄，而用变焦距摄影镜头时，就只能用三脚架拍摄了（此时被摄景物还应静止不动，否则所摄影像将会发虚）。此外最大相对孔径较小还将使反光取景器中的影像亮度较低，调焦困难，并易出现调焦误差，从而使所摄影像清晰度降低。

变焦距摄影镜头的最近调焦距离对其长焦距端而言，尚不算太远，但对其短焦距端而言却显得较远了。显然，用该类镜头短焦距一端拍摄时，将无法移至相应定焦距摄影镜头那样近的距离处拍摄。

由于变焦距摄影镜头的工作状态复杂，以至设计中很难对其在各种焦距、各种调焦距离和各挡光圈数下，均作到完善的像差

校正。因此，在设计和制造变焦距镜头时，为了兼顾上述各种焦距、调焦距离、F数的不同特点与不同要求，对像差校正进行了较大的妥协，从而允许变焦距镜头比同级定焦距镜头残存某些略大的像差。因而变焦距摄影镜头一般只能在变焦距标尺中的若干焦距处，获得较好的成像质量，而很难在所有焦距处均获得同样高的成像质量。

此外，变焦距摄影镜头在变焦过程中一般还普遍存在着微量的**像面漂移**现象（又称像面位移，如国产10×25型、即焦距25至250毫米电影用变焦距摄影镜头，允许残存±0.08毫米的像面漂移误差，我国规定照相用Ⅰ级、Ⅱ级变焦距摄影镜头的像面漂移值应分别小于或等于焦深的50%、100%），镜头中控制变倍群和补偿群运动的精密空间凸轮也存在着尺寸误差（包括制造、装配误差及因磨损后出现间隙而引起的误差），再加上变焦距镜头因受体积和重量等的限制，而采用部分组元调焦方式（这将使不同调焦距离下的像差大小，存在着明显差异），以及因透镜片数多而导致的杂光较大等等，这些均将导致变焦距摄影镜头所摄影像质量的明显降低。鉴于上述种种原因，目前世界著名光学公司所生产的高级变焦距摄影镜头，其成像质量（如分辨率、明锐度等）也仅达到中级定焦距摄影镜头的水平而已，即高级变焦距镜头与高级定焦距镜头相比，前者的成像质量仍略逊一筹，而无法与后者媲美。至于大变焦倍率的变焦距镜头，其成像质量就更差了，有的甚至会在变焦过程中出现成像质量明显降低的现象，故目前照相用变焦距镜头，以变倍率不超过三倍者为最佳。当然，不同厂家、甚至同一厂家生产的不同型号变焦距镜头之间，其成像质量的差异往往较大。正因如此，在世界艺术摄影竞赛中，获奖者也多为定焦距摄影镜头所拍摄。广告摄影更需依赖定焦距摄影镜头。

由于电影摄影界能够接受高质量产品的相对昂贵价格，并能

容忍摄影镜头的庞大体积和重量（因故事片电影一般是把电影摄影机安装在三脚架上拍摄的），故为了摄影艺术创作的需要，光学公司为35毫米电影摄影机专门设计了5×、6×、10×等高变倍率、大体积的变焦距摄影镜头。例如，35毫米电影的画幅不足135照相机的一半，但柯克5倍20～100毫米、1:2.8变焦距镜头的直径达145毫米、光学系统长（自像平面算起）高达370毫米，重量达4公斤，这样大的体积和重量显然是照相界所无法接受的。若比较英国柯克（Cooke）5×（20～100毫米）与10×（25～250毫米）变焦距镜头，或比较法国昂热尼厄6×（20～120毫米）与10×（25～250毫米）变焦距镜头的成像质量，不难发现，两厂所生产的较小变倍率（5×或6×）之变焦距镜头的成像质量，均远远优于同厂生产的大变倍率（10×）的变焦距镜头，且前者的价格也远远高于后者。

变焦距摄影镜头在变焦时，其实际光圈数往往也在微量改变，不过只要变化量未超过5%，各厂均不标示出其变化情况，只有当T值的变化量远大于5%而达1/3或1/2级光圈时，某些厂家才在镜筒上标出该变化情况。

某些变焦距镜头对畸变像差校正得不好，残存畸变像差有的位于短焦距端，有的位于长焦距端，也有的位于中等焦距处。故在残存明显畸变的焦距处摄影时，应避免在画面中出现较多的横竖线条（尤其是在画幅边缘），以免影响画面效果。

变焦距摄影镜头在全开光圈下摄影时像差较大，而且画面中央与边缘的照度往往相差明显。

变焦距摄影镜头因镜片数目多，所以逆光摄影时易出现眩光与幻影现象。虽然有时可有意利用幻影以创作出特殊的艺术效果，但多数情况下，较严重的眩光与幻影对摄影是不利的。此外，变焦距镜头的视角将随变焦过程而改变，故很难使固定遮光罩在各种焦距下均能有效地进行遮光，这也是此类镜头眩光较严

重的一个原因。

与定焦距摄影镜头相比，变焦距镜头的体积较大、重量也较大，这对手持摄影很不利。近年来虽有一些小型化变焦距镜头问世，但一般是以损失部分性能为前进而设计的。

变焦距摄影镜头由于结构复杂、精度要求较高、工艺难度较大，因而成本一般较高。

有些变焦距摄影镜头具有光学微距摄影功能（详见第四章第三节一中内容），但此类镜头的微距挡一般在较小光圈下才可获得较好的效果，其像质也无法与定焦距的微距摄影镜头相比，且变焦距镜头微距挡的影像放大率也很有限，一般为 1:4 左右。

某些供电影、电视摄影用的变焦距摄影镜头上，备有电动变焦控制装置，该装置可驱动变焦环，按摄影者的意愿进行或大或小、或快或慢的连续、均匀、平稳、精确的变焦动作，运动中既无惯性又无噪声。

第三节　特殊摄影镜头的种类与特点

具有特殊功能与用途的摄影镜头称为特殊摄影镜头。特殊摄影镜头的种类较多，且用途各异。

一、微距摄影镜头（Macro）[①]

微距摄影镜头指同时具有微距摄影功能和普通摄影功能的特殊定焦距摄影镜头。微距摄影镜头不需要安装近摄镜或近摄接圈、近摄伸缩皮腔等附件，就可在非常近的距离处拍摄微小物体或物体细微局部的特定画面。

① 尼柯摄影镜头（Nikkor）中的微距镜头标作 Micro

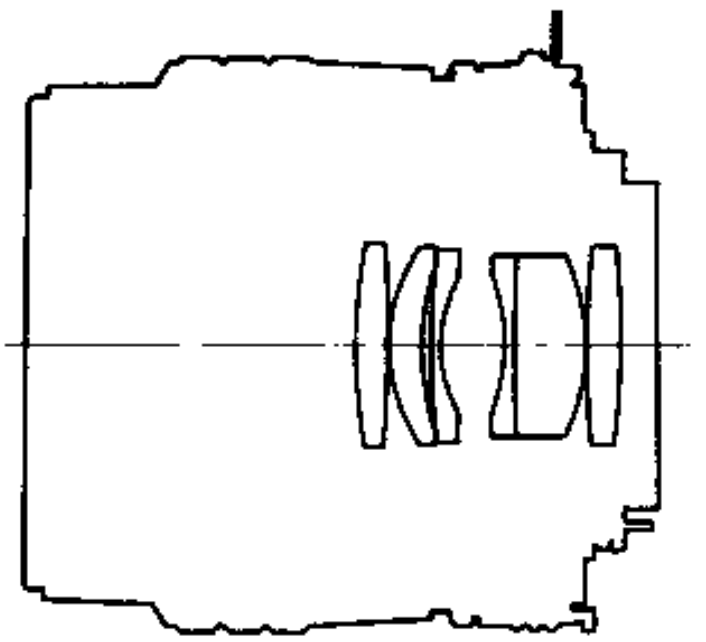
普通摄影镜头主要供拍摄自无限远至较近调焦距离处的景物用，即普通摄影镜头是以中等距离和远距离摄影为目的而设计与校正像差的。显然，若用普通摄影镜头安装近摄附件附件后在极近距离处拍摄，则其像差将明显增大，成像质量显著下降。尤其是一些相对孔径较大的摄影镜头（如最大相对孔径为1:1.2、1:1.4的摄影镜头），在近摄时，其画幅边缘的影像往往不够清晰，而且缩小光圈一般也无明显改善。

微距摄影镜头是专以拍摄微小物体和翻拍等近距离摄影为目的而设计与校正像差的。因而在近距离摄影时，该摄影镜头的像场非常平（即场曲像差极小）、分辨率很高、畸变像差很小、影像的对比度高、色彩还原好，总之，该镜头在近摄时具有良好的结像能力。例如，定焦距的微距摄影镜头，其最佳像质一般设计在影像放大率为1:10的调焦距离处。此外，微距摄影镜头的成像质量在整个调焦范围内变化不大，故也适于进行普通摄影。

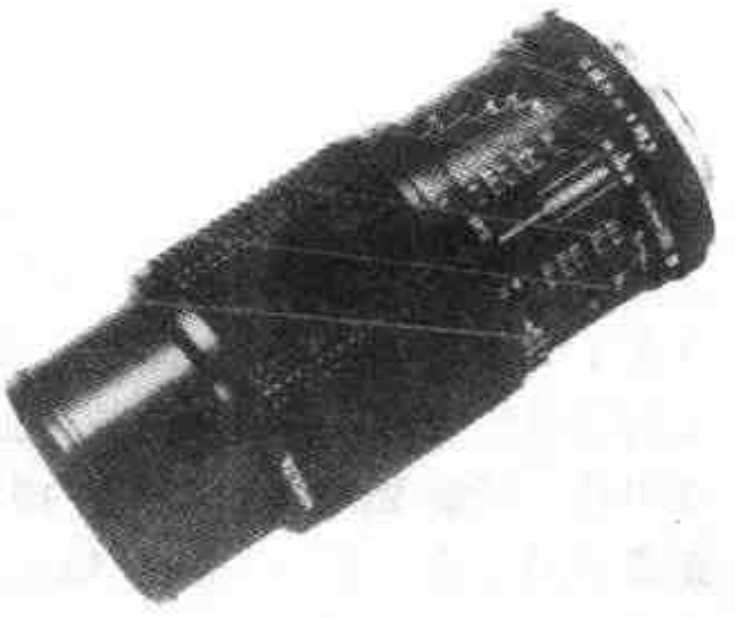
普通摄影镜头平时虽可拍摄远处景物，但不能直接近摄，在安装近摄附件装置后却又只能拍摄近外物体——不能再立即拍摄远处景物。而微距摄影镜头则可由微距状态迅速调至普通摄影状态，即自近摄至无限远之间可连续调焦，因此使用时非常方便。例如，微距摄影镜头一般可由无限远直接调焦至影像放大率为1:2左右的极近距离处。

微距摄影镜头在结构上有两种形式。

一种是一只具有内置伸缩镜筒的摄影镜头。在普通摄影时，只要转动调焦环就可进行正常调焦；如需进行微距摄影，只要将转至最近调焦距离处的调焦环继续转动，就可使整个光学系统随同内置伸缩镜筒一起迅速前移，使像距显著增大。如日本产尼柯Micro 55mm、1:2.8摄影镜头（见图4—12a所示）、美能达MD Macro 100mmF4摄影镜头（见图4—12b所示）、瑞士产微距司威特（Macro Switar）电影摄影镜头。



a.

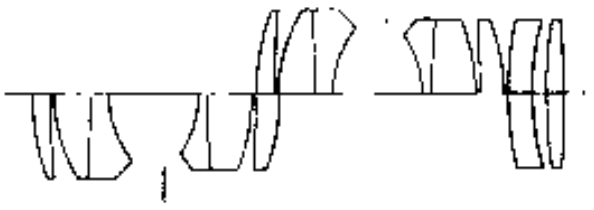


b.

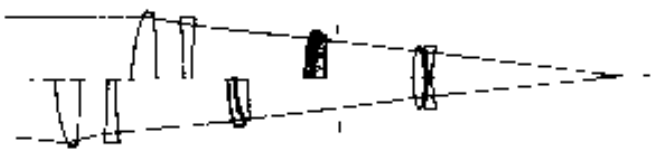
图 4—12　微距镜头

另一种是通过改变摄影镜头内的部分光学透镜组的前后位置，来实现微距摄影，并获得较高影像放大率的。例如，日本产

腾龙（Tamron）SP 90mm、1:2.5 摄影镜头（代号 52B），在调到微距状态时，光圈与部分光学透镜组同步前移（如图 4—13a 所示）；腾龙 SP 300mm、1:5.6 摄影镜头（代号 54B），在调到微距状态时，光圈不动，仅部分光学透镜组移动，如图 4—13b 所示。



a.



b.

图 4—13 腾龙微距镜头

鉴于设计上的原因（为了减小场曲、畸变等像差、改善像质及不过于增大镜片与镜筒直径），微距摄影镜头的最大相对孔径一般略小一些（在 1:3.5 左右），因而不利于低照度下拍摄。另外，基于结构上的原因，微距摄影镜头一般只能在有限的近距离处拍摄，若不加附件一般尚无法拍摄出 1:1 的影像。

常见的微距摄影镜头有：尼柯 Micro 55mm、1:2.8，105mm、1:4，200mm、1:4；潘太克斯 Macro 50mm、1:4，100mm、1:4；佳能 Macro FD50mm、1:3.5，100mm、1:4；佳能 Macro FD50mm、1:3.5，100mm、1:4；美能达 Macro 50mm、1:3.5，100mm、1:4。

目前，某些变焦距摄影镜头也设计有微距摄影功能。这类摄影镜头一般是通过改变摄影镜头内的部分光学透镜组位置，来实现微距摄影功能的。由于受结构尺寸、像差校正等因素的限制，这类变焦距摄影镜头的微距功能有限——一般可自无限远直接调

焦至影像放大率为1:4左右的近距离处（而普通微距摄影镜头的影像放大率却高达1:2）。由于变焦距摄影镜头的像差校正较困难，因而这类变焦距摄影镜头在调至微距挡时像差较大（远不如普通微距摄影镜头的成像质量好），甚至有明显的畸变、场曲等像差存在。

具有微距功能的变焦距摄影镜头主要有下列三种类型：只有先变焦至长焦距挡，尔后才可调往微距挡进行近摄（例如，美能达 MD 35～105mm、1:3.5 推拉式变焦距摄影镜头；图丽 AT-X 28～85mm、1:3.5～4.5 旋转式变焦距镜头）。需先变焦至短焦距挡，尔后才可调往微距挡进行近摄（例如，佳能 FD 70～210mm、1:4 推拉式变焦距摄影镜头，美能达 MD 28～85、1:3.5～4.5 旋转式变焦距摄影镜头）。可在任意焦距处进行微距摄影（例如，图丽 SMZ 或 RMC 35～105mm、F3.5～4.3 推拉式变焦距摄影镜头、腾龙 SPZ 28～80mm、F3.5～4.2 旋转式变焦距摄影镜头）。

图4—14所示为日本佳能 FD 35～70mm、1:2.8～3.5 微距式变焦距摄影镜头，在焦距分别调至35mm、70mm及微距挡时的光路图。该摄影镜头前面五片透镜为调焦兼变倍组，后方五片透镜为补偿兼微距组。

对于焦距较长的定焦距微距摄影镜头（如100毫米、200毫米），以及微距功能设计在长焦距一端的变焦距摄影镜头，由于是在较长焦距下进行微距摄影，故此具有下列优点：

1. 便于布光。由于拍摄时摄影镜头与被主体之间可以具有较大的空间纵深距离，因而便于从容布置对被摄主体的照明布光——不会由于摄影镜头过于逼近被摄主体而阻挡了被摄主体的正常受光。

2. 不易惊动被摄主体。由于拍摄时摄影镜头离被摄主体较远，故此当拍摄昆虫一类活体对象时，不易妨碍、惊动其正常自然状态。

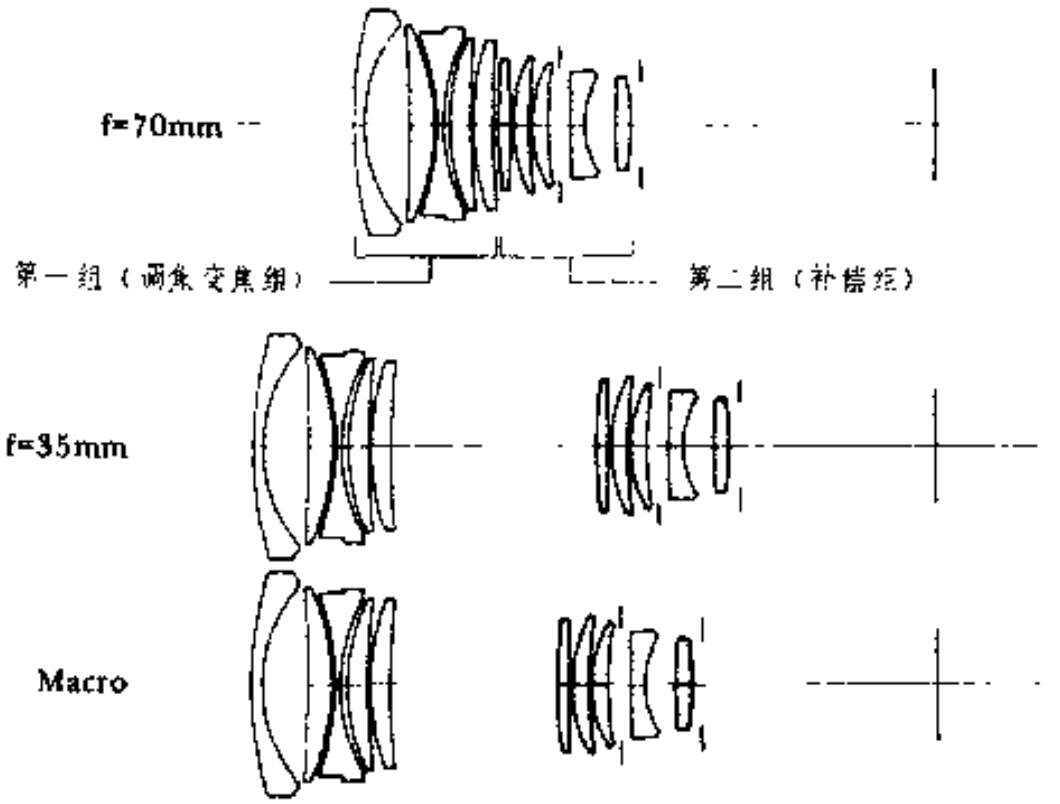


图 4—14 佳能 FD35～70mm 镜头

当然，这类微距摄影镜头不利于进行翻拍工作——过远的拍摄距离将使翻拍架过于庞大，也不利于进行大倍率的翻拍。

对于焦距较短的定焦距微距摄影镜头（如焦距为 50 毫米、55 毫米），以及微距功能设计在短焦距一端的变焦距摄影镜头，其优缺点刚好与上述相反。

对于具有微距功能的变焦距摄影镜头，其微距功能设计在长焦距端（或短焦距端）的优缺点，与上述相应焦距较长（或较短）的定焦距微距摄影镜头具有相似的特点。其中微距功能仅设计在长（或短）焦距端的变焦距摄影镜头，一旦调至微距状态时，该镜头一般即无法再作变焦操作，即欲变焦必须先脱离微距摄影状态。

二、透视调整摄影镜头（PC、TS、Shift）

透视调整摄影镜头（PC 即 Perspective Control）又称倾斜、移位摄影镜头（TS 即 Tilt & Shift）或移位摄影镜头（SHIFT）。

透视调整摄影镜头可在照相机机身和胶片平面位置均保持不变的前提下，使整个摄影镜头的光轴进行平移，甚至进行倾斜或旋转，从而达到调整所摄影像透视关系的目的。

为了在摄影镜头光轴平移后，仍能保证在底片上获得清晰影像，透视调整摄影镜头的基准清晰像场远大于普通摄影镜头（参见图 3—2 所示）。例如，勃朗尼卡 ETRS 型 120 照相机的画幅对角线尺寸为 69.6mm（其画幅尺寸为 42.5mm × 55.1mm），而为其配套之吉野 PCS 55mm、F4.5 透视调整摄影镜头的基准清晰像场直径高达 104mm。

透视调整摄影镜头的上述调节功能，可使普通单镜头反光照相机具有大型专业照相机（如德国产林哈夫 LINHOF 照相机、瑞士产仙娜 SINAR 照相机，日本产骑士 HORSEMAN VH-R 型照相机）的透视调整摄影功能。这一功能对用反转片直接拍摄幻灯片时尤为重要。因为反转片拍摄幻灯片后不经过放大加工，因而无法在后期制作中对所摄影像进行透视校正。

透视调整摄影镜头一般没有自动光圈功能，多数需缩小光圈测光。

摄影镜头光轴同时具有平移和倾斜功能的透视调整摄影镜头，常见者有下列几种：佳能 TS 35mm、F2.8 S.S.C 透视调整摄影镜头（其外形参见图 4—15a 所示），采用 8 组 9 片式光学结构，光轴既可沿上、下（或左、右）两方向各平移 11mm（参见图 4—16a），又可向左、右（或上、下）两方向各倾斜 8°角（参见图 4—16b 所示）；勃朗尼卡、吉野 PCS 55mm、F4.5 透视调整

摄影镜头（其外形见图 4—15b 所示），采用 8 组 10 片式光学结构，摄影镜头光轴水平平移为 12mm，垂直平移向上为 12mm、向下为 10mm），摄影镜头光轴向上、下的倾斜角度可达 10°。如图 4—17 所示。

a.

b.

图 4—15 透视调整摄影镜头

摄影镜头光轴仅具有平移功能的透视调整摄影镜头，常见者有下列几种：德国产莱兹 PA-CURTAGON-R35mm、F4 透视调整摄

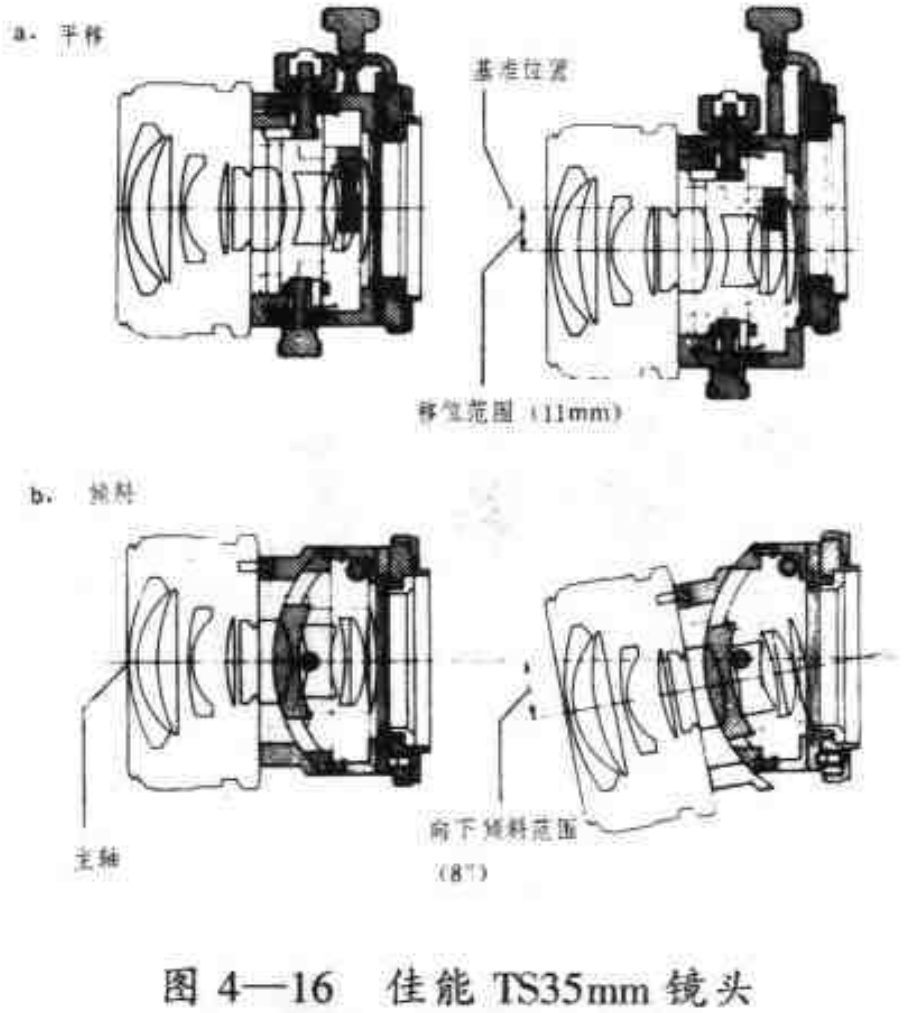


图 4—16　佳能 TS35mm 镜头

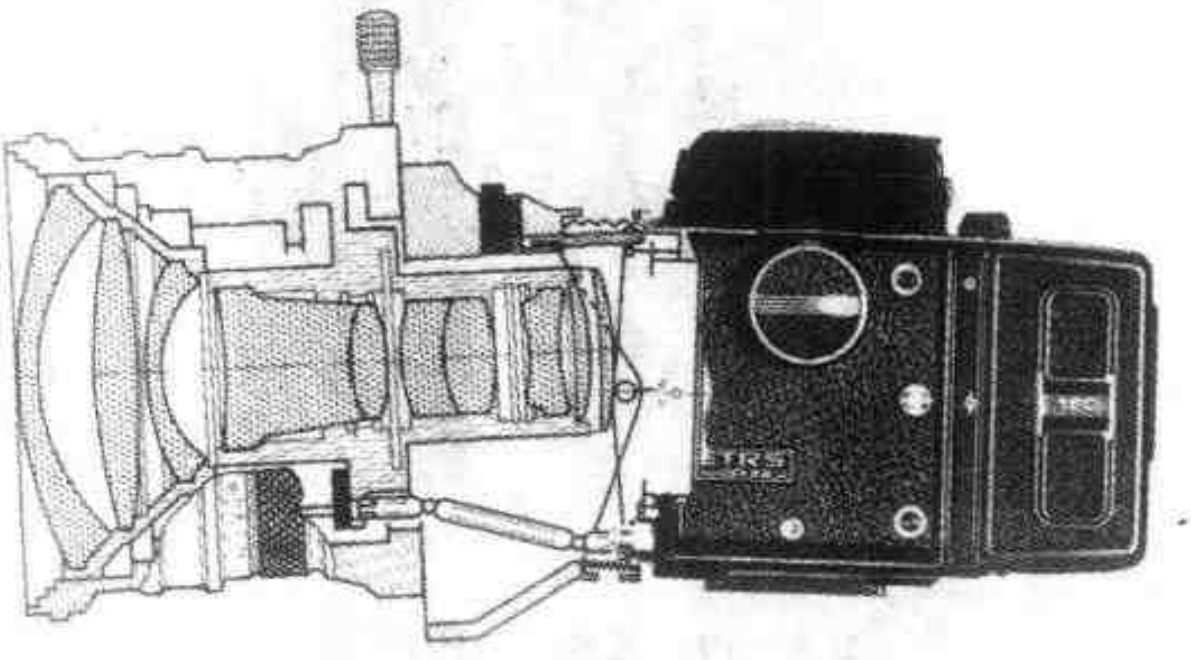


图 4—17　勒朗尼卡 PCS 55mm 镜头

影镜头（其光轴只可向一个方向平移 7mm，同时整个光学系统可绕镜头联接环作 360°旋转，并有四挡定位，从而可使摄影镜头达

到向任意方向平移的效果），尼柯 PC 28mm、F3.5 和 35mm、F2.8 透视调整摄影镜头（其光轴仅能向一个方向平移 11mm，但整个镜头可绕联接环旋转 360°，并有 12 挡定位处，如图 4—18 所示），潘太克斯 SHIFT 28mm、F3.5 透视调整摄影镜头。

图 4—18 尼柯 PC 镜头

图 4—19 美能达 SHIFT 镜头

美能达 SHIFT CA35mm、F2.8 透视调整摄影镜头的结构和性能比较特殊（其外形参见图 4—19 所示）：该摄影镜头采用 7 组 9 片式光学结构，同时具有水平平移调节钮与垂直平移调节钮，分

a.

b.

图 4—20　美能达镜头拍摄效果

别控制摄影镜头光轴沿水平方向向左或右平移 8mm，沿垂直方向向上或下平移 11mm；此外该镜头前端还有一场曲像差调节环，向左或右转动该环，可使该镜头的场曲像差逐渐增大——使该镜头的平直像场逐渐弯曲，并且转动角度愈大，像场弯曲程度愈强烈，从而调整所摄影像的清晰程度。正转该场曲像差调节环可使理想像场向前弯曲，反转该环则可使理想像场向后弯曲，以分别拍摄如图 4—20a 和图 4—20b 中所示沿纵深弧线分布的景物，并获得远近景物均非常清晰的画面效果。

三、柔焦摄影镜头（Soft、Imagon）

柔焦摄影镜头又称柔光镜头，它可在不用柔光镜或纱等附件的条件下，直接拍摄出具有柔光效果的画面。

柔焦摄影镜头主要用于拍摄人物肖像。它可使人物面部的皱纹、斑点、凹坑、小疙瘩等在所摄底片上变得不明显，甚至消失，使影像柔和悦目，使人物更加年轻、漂亮、妩媚、娇柔。用柔焦镜头还可拍摄出梦幻效果的风景照片。

常见柔焦镜头有：德国产罗敦司特（Rodenstock）伊梅冈（Imagon）焦距200mm、250mm、300mm柔焦摄影镜头，日本产富士侬（Fujinon）SFS 150mm、250mm、F5.6及富士侬80mm、F4柔焦摄影镜头。上述镜头在透镜光路中，装有一与光轴垂直的多孔金属片，成像光线通过这些小孔时可产生扩散现象，从而使胶片上的影像呈现出柔光效果；此镜头柔光效果的强弱可由光圈的大小进行控制，当光圈调至最小时，可做正常摄影镜头使用。上述镜头中最后一只系供135照相机使用的，其余系供大型专业照相机使用的。图4—21所示为伊梅冈300mm、F6.8柔焦镜头的外形。富士侬80mm、F4柔焦镜头备有三种不同规格的多孔金属片，故能获得不同的柔光效果。

此外，还有一种可调柔焦镜头。如美能达85毫米、F2.8-VARISOFT摄影镜头，此镜头上有--柔焦调节环，分四挡：0挡无柔焦效果，供正常摄影用；自1至3挡，柔焦效果逐渐明显。当自0挡向1至3挡调节柔焦调节环时，该镜头逐渐产生愈来愈大的人为球差，从而使所摄底片产生柔焦效果。其外形如图4—22所示。

使用柔焦摄影镜头摄影时，由于柔焦状态下被摄主体的影像发虚、模糊，故此调焦工作应格外精心。倘若使用的是具有可调

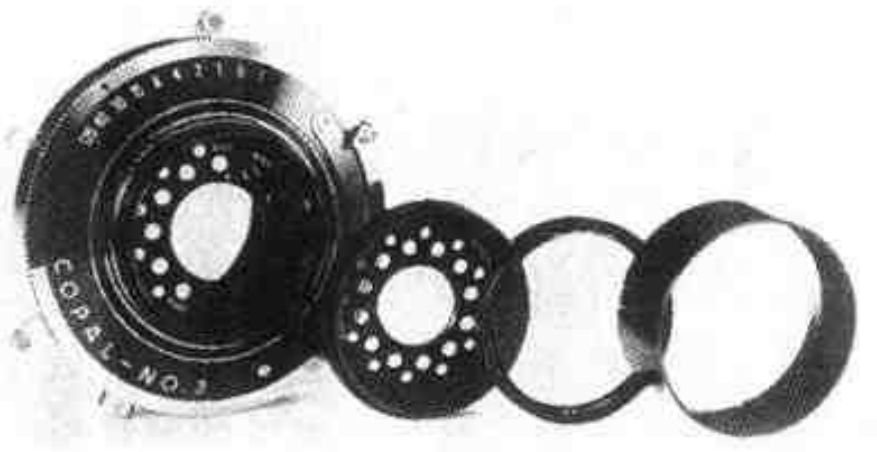


图 4—21　罗敦司特柔焦摄影镜头

图 4—22　美能达可调柔焦镜头

柔焦状态的柔焦摄影镜头（如前述美能达 85 毫米、F2.8 VARI-SOFT 摄影镜头），建议先把摄影镜头调至 0 挡（无柔焦）下精确

调焦，尔后才根据需要调节柔焦效果并拍摄。

四、短筒摄影镜头（Bellows）

短筒摄影镜头又称伸缩皮腔用摄影镜头。此类摄影镜头上没有调焦机构，因而尺寸较小、较短，容易制造，成本略低。

短筒摄影镜头专供安装在有伸缩皮腔的照相机上使用（例如大型专业照相机），或借助伸缩皮腔附件安装在135照相机上使用。后者如日本产尼柯Bellows105毫米、1:4摄影镜头，该镜头借助PB-4和PB-5型伸缩皮腔调焦装置，可自无限远至极近距离处（影像放大率达1.3:1）连续调焦，该镜头的分辨率非常好。

选用短筒摄影镜头时，应注意使镜头的像面定位距值与伸缩皮腔的折叠厚度彼此配套，否则可能会出现下述现象：伸缩皮腔已缩至最短距离处，而无限远处的景物仍不能清晰成像。

五、自动调焦摄影镜头（AF、Autofocus）

当照相机或摄影镜头测量出被摄主体至胶片平面的精确距离，并发出相应电子信号的瞬间，自动调焦摄影镜头能依据该电子信号的指令，立即自动、精确、迅速、无惯性地驱动调焦环完成调焦工作，使被摄主体在感光胶片上获得最清晰的影像。

自动调焦摄影镜头有主动型和被动型两类。

主动型自动调焦摄影镜头上有驱动调焦环转动的直流伺服马达与传递动力的传动齿轮及有关电路，或超声波马达。早期的AF镜头有的还有供安装电池的电池室（一般为5号电池）。这类镜头又分专用式和通用式两种，前者是为某一种品牌的照相机专门生产的、只能应用在该品牌的某几种型号照相机上；后者可以直接应用在许多品牌的一系列型号照相机上。

专用式主动型自动调焦摄影镜头的测距元件一般位于照相机机身内。如日本产潘太克斯（Pentax）MEF 型 135 单镜头反光照相机，及与其配套的 AF35～70 毫米、1:2.8 自动调焦摄影镜头，这款镜头的调焦马达与调焦电源均安装在摄影镜头上，在照相机取景器视场下方有发光二极管（LED）显示的调焦准确与否的信号。又如日本产佳能（Canon）EOS1V、1N、5、620、650 等型 135 单镜头反光照相机，及与其配套的一系列自动调焦镜头，该系列镜头之调焦电源直接借用机身上的电源，故减小了摄影镜头的体积和重量，如图 4—23 所示。该类镜头上还有控制自动光圈大小的直流电磁光圈。

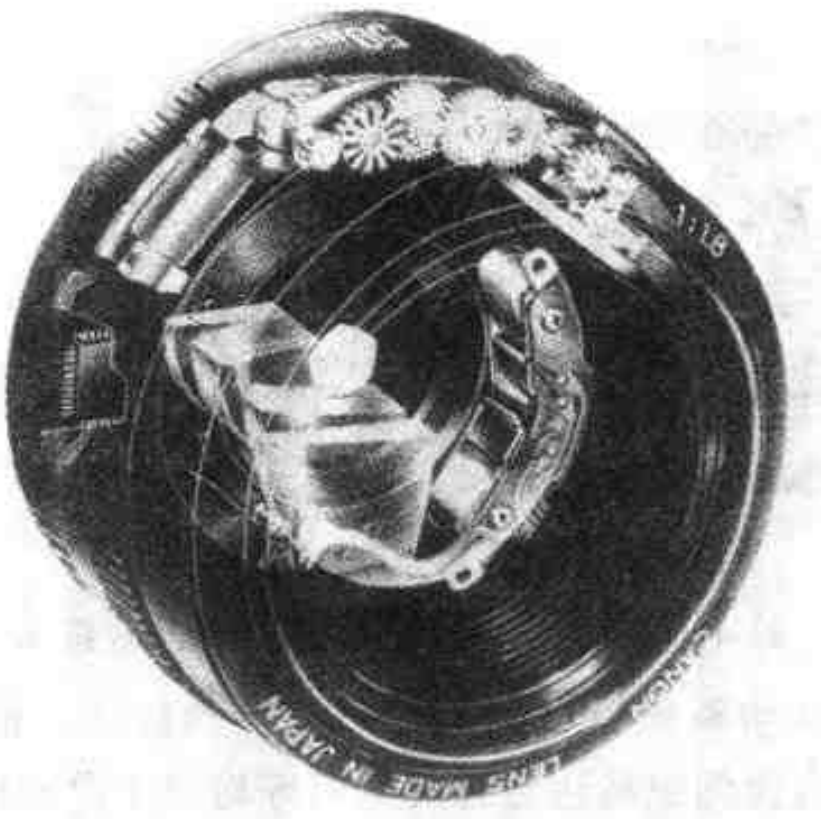


图 4—23　佳能专用式主动型 AF 摄影镜头

通用式主动型自动调焦摄影镜头是一种新型摄影镜头，由日本腾龙（Tamron）公司首先推出。该镜头的测距元件、电路、调焦马达、甚至驱动调焦马达的电源均安装在摄影镜头上。图 4—24 所示为腾龙 AF70～210 毫米、F4（IF）型通用式自动调焦摄影

镜头。在该镜头光路中有一分光棱镜，此分光棱镜除使绝大部分光线投射到感光胶片处外，尚可使少量成像光线转折方向，投射到镜头光路旁侧的测距传感元件上，从而使该镜头对被摄主体进行精确测距，进而将相应电子信号输入到直流伺服马达上，操纵调焦环精确调焦。这种腾龙通用式 AF 镜头可安装在潘太克斯、尼康、佳能、康太克斯、美能达、奥林巴斯、罗莱弗莱克斯、雅西卡、玛米亚、富士卡、柯尼卡、托普康、普拉蒂卡、理光等 135 单镜头反光照相机上（在往不同品牌照相机上安装前，需在该摄影镜头后端装上相应的镜头联接环）。

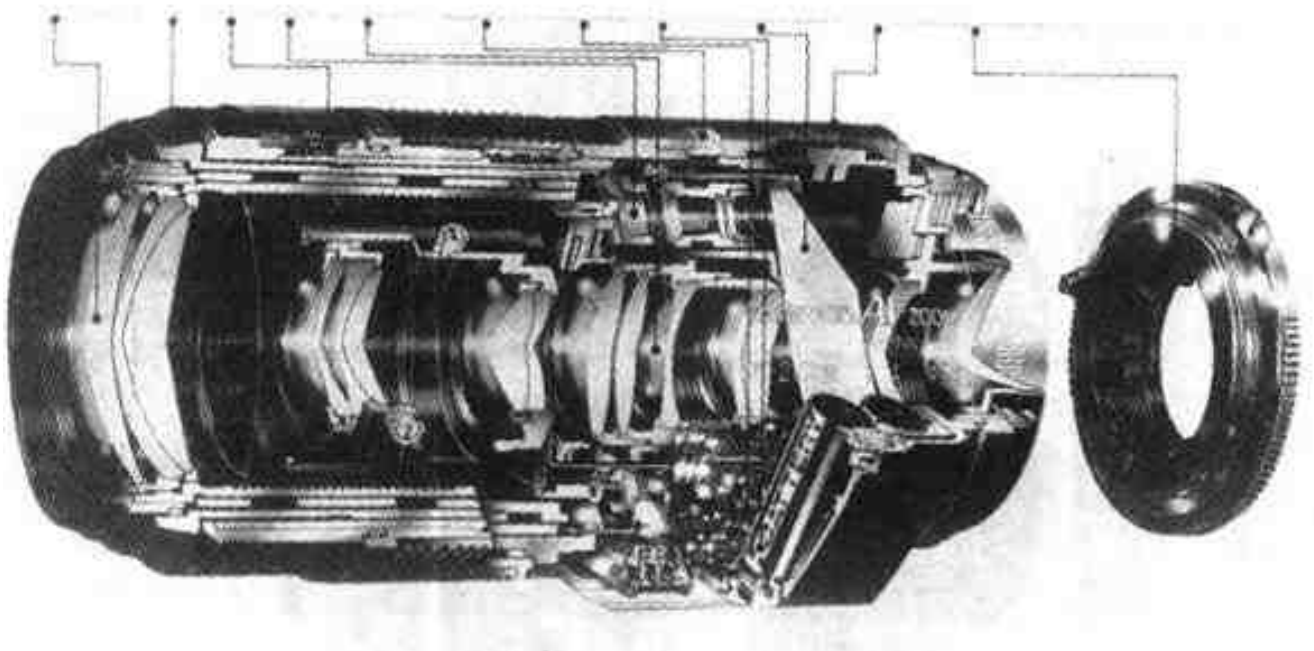


图 4—24 腾龙通用式主动型 AF 镜头

被动型自动调焦摄影镜头上只有传动齿轮，而测距传感元件、电源、直流伺服马达与有关电路等均位于照相机机身上，这既下降了摄影镜头的体积和重量，又减少了摄影镜头的成本。显然，这种专用式被动型 AF 镜头，要比前述专用式主动型 AF 镜头，在经济上和携带方便性上更为合理。常见被动型 AF 镜头有美能达 α7、α9 型 135 单镜头反光照相机的配套摄影镜头，尼康 F5 型、F100 型 135 单镜头反光照相机的配套摄影镜头。如图 4—25 所示。但该镜头只能应用在该厂生产的相应自动调焦型号照

相机上。

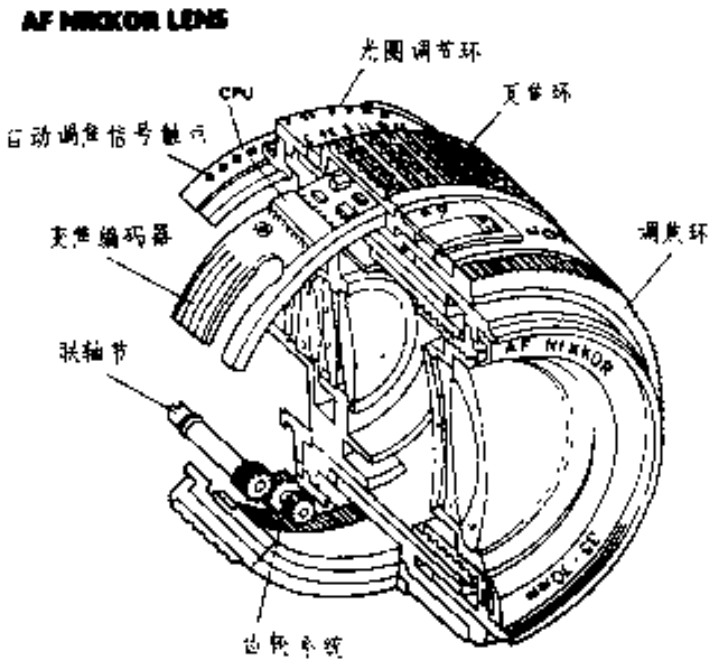


图 4—25　尼康专用式被动型 AF 摄影镜头

六、医用摄影镜头（Medical）

日本产尼柯 MEDICAL 120 毫米、F4 IF 型，200 毫米、F5.6 型医用摄影镜头的外形见图 4—26 中 a、b 所示。

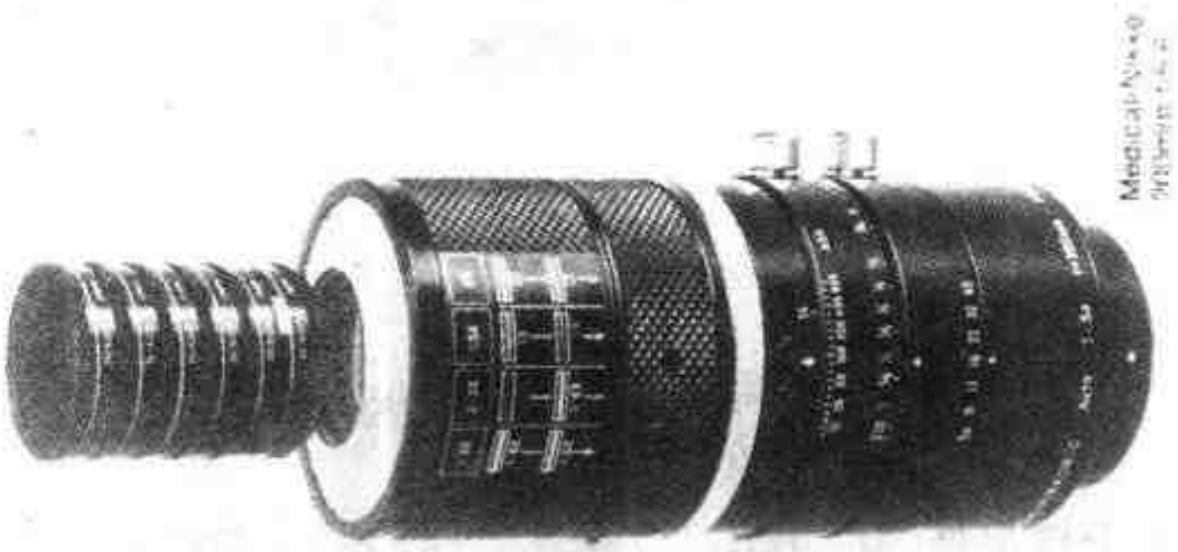
医用摄影镜头是一种有内置环形 X 闪光灯的微距摄影镜头，可对不便用一般方法加以照明的被摄物体，进行无阴影现象的 X 闪光摄影，并且操作简便、影像清晰。

这类镜头除用于医学解剖等摄影外，还被广泛用于公安侦察摄影。

上述尼柯 120 毫米医用镜头属于内调焦式摄影镜头，可拍摄出影像放大率为 0.8 × 至 2 × 的画面；尼柯 200 毫米医用镜头为无调焦环的摄影镜头，拍摄时需前后移动单镜头反光相机至取景器内的影像达最清晰时为止，此后即可拍摄，该镜头可拍摄出影像放大率为 1/15 × 的画面，若装上配套的近摄镜片（见图 4—

26b)，可获得影像放大率自 1/8 × 至 3 × 的画面。

a.



b.

图 4—26　医用摄影镜头

七、显微摄影镜头（Micro）

显微摄影镜头的焦距一般很短，是专供拍摄微小物体用的摄影镜头。

常见显微摄影镜头有：佳能 MACROPHOTO 20 毫米、F3.5，35 毫米、F2.8 显微摄影镜头（两者可拍摄出影像放大率分别为 4 × ~ 10 × 及 2 × ~ 5 × 的画面）；美能达 BELLOWSMICRO 25 毫

米、F2.5，12.5毫米、F2显微摄影镜头（前者加M1和M2联接圈拍摄时，可分别获得影像放大率为3.2×～8.1×和4.4×～9.3×的画面；后者加M1和M2联接圈拍摄时，可分别获得影像放大率为8×～18×和10.5×～20.5×的画面）。

八、内窥摄影镜头（Endoscopic Photography）

内窥摄影镜头是由微型摄影镜头及传像光缆与照明光缆共同组成的特殊摄影系统。光缆系由很多根纤细、柔软、易弯曲的光导纤维构成，故可将微型摄影镜头探入到复杂物体内部，然后将微型摄影镜头所结成的清晰影像，通过具有全反射特性的光导纤维，自物体内部传导到物体外部的照相机上，从而可在物体外部摄下物体内部的清晰影像。这是用普通摄影镜头所无法实现的。

为了使内窥摄影镜头能比较准确地对准欲拍摄目标，改善操作性能，使之更简单、方便、容易，有的内窥摄影镜头具有弯曲调节机构，只要在物体外面拨动相应手钮，就可操纵位于物体内部的光缆端部带动微型摄影镜头，作上下、左右弯曲运动，从而使微型摄影镜头的光轴摇向物体的不同部位（有的可做上、下各120°的弯曲、左右各100°的弯曲）。

微型摄影镜头的体积非常小，焦距较短，视角较大。有的镜头甚至具有变焦距功能。

照明光源一般位于照明光缆的另一端，并通过该光缆将光线传导至物体内部，对被摄区域进行适当照明。

图4—27所示照片为美国光学公司用内窥摄影镜头拍摄的微型分辨率图案，由图中可知，光导纤维的直径粗细，直接影响着所摄影像的分辨率高低，拍摄此图所用内窥摄影镜头中，光导纤维的直径为0.0004英寸（0.01016毫米）。

为了保护光导纤维不至损坏，光缆一般包在柔软、光滑的不

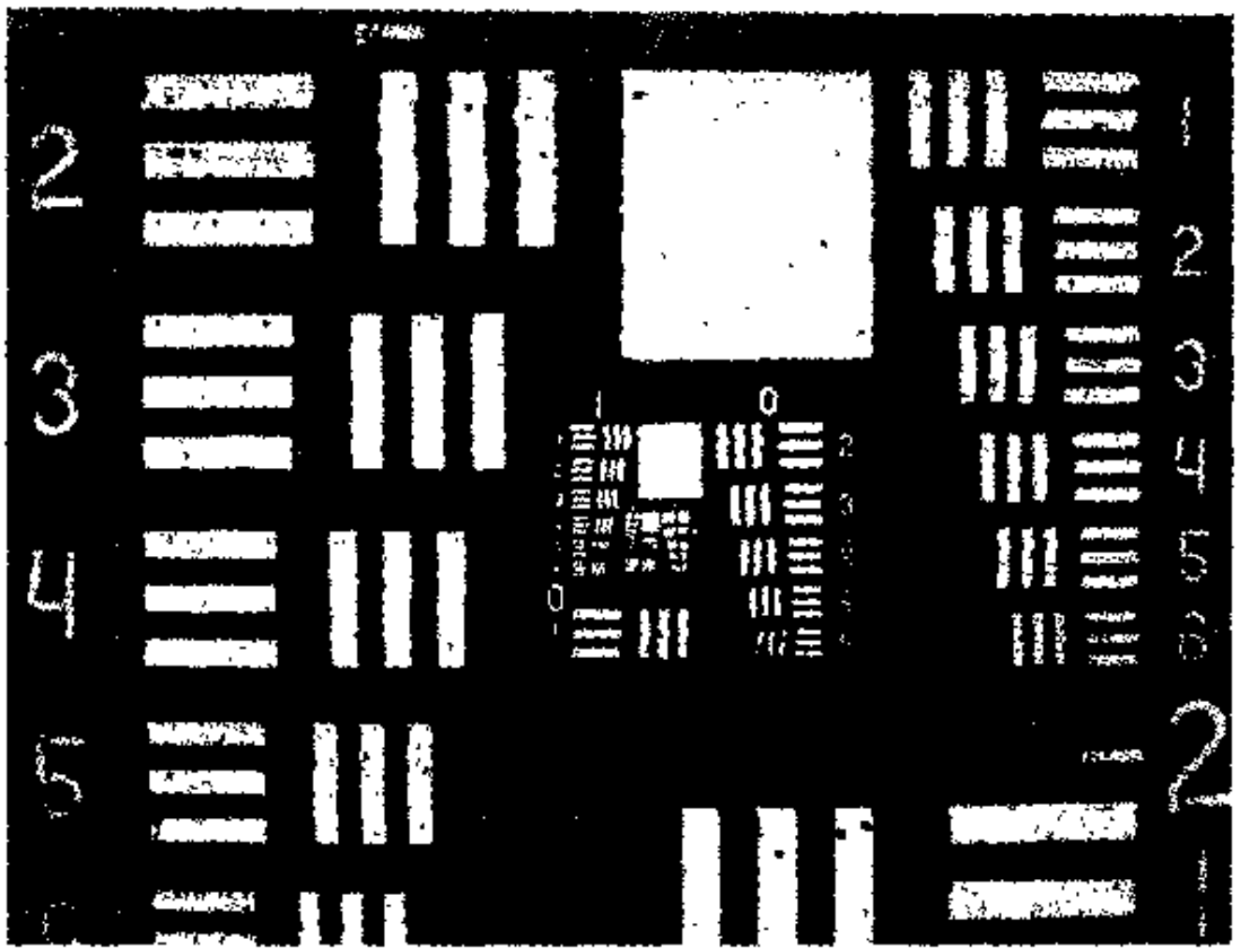


图 4—27　内窥摄影镜头所摄影像

锈钢或塑料保护套内。

内窥摄影镜头被广泛应用于科学研究、工业生产与医学领域。如在工业生产中用于检验铸件等零件的内部质量，观测运动零部件的运动情况、润滑情况等；在医学中检查人体食道、胃部、肠道、尿道、膀胱、子宫、输卵管，以至心脏内部的病变状况。日本日立制作所甚至把直径 1 毫米的石英玻璃纤维安装在火花塞中部，测量汽油发动机的燃烧状态（如燃料的浓度、火花的强度、火色），并通过电子计算机的分析而获得燃料喷射控制装置与火花塞点火装置的最佳配合状态，从而使输出功率增加约 10%，噪声降低约 10 分贝。

九、红外线（Infrared）与紫外线（UItraviolet）摄影专用摄影镜头

红外线、紫外线摄影专用摄影镜头属于超消色差摄影镜头。

此类摄影镜头主要用于科学研究、公安与军事领域。例如，用于资源卫星考察、探矿，森林火灾预警，公安侦破，军事侦察等。

例如，美能达 85 毫米、1:3.5 超消色差摄影镜头。

虽用普通摄影镜头安装红或紫外线摄影滤光镜后，也可进行红或紫外线摄影，但其所摄影像质量远远无法与使用上述专用摄影镜头的效果相比。

十、夜视摄影镜头（Nightscope）

夜视摄影镜头指可在夜间月光、甚至星光的微弱照明下进行正常摄影，并获得曝光适宜、影像清晰之照片的特殊摄影镜头。

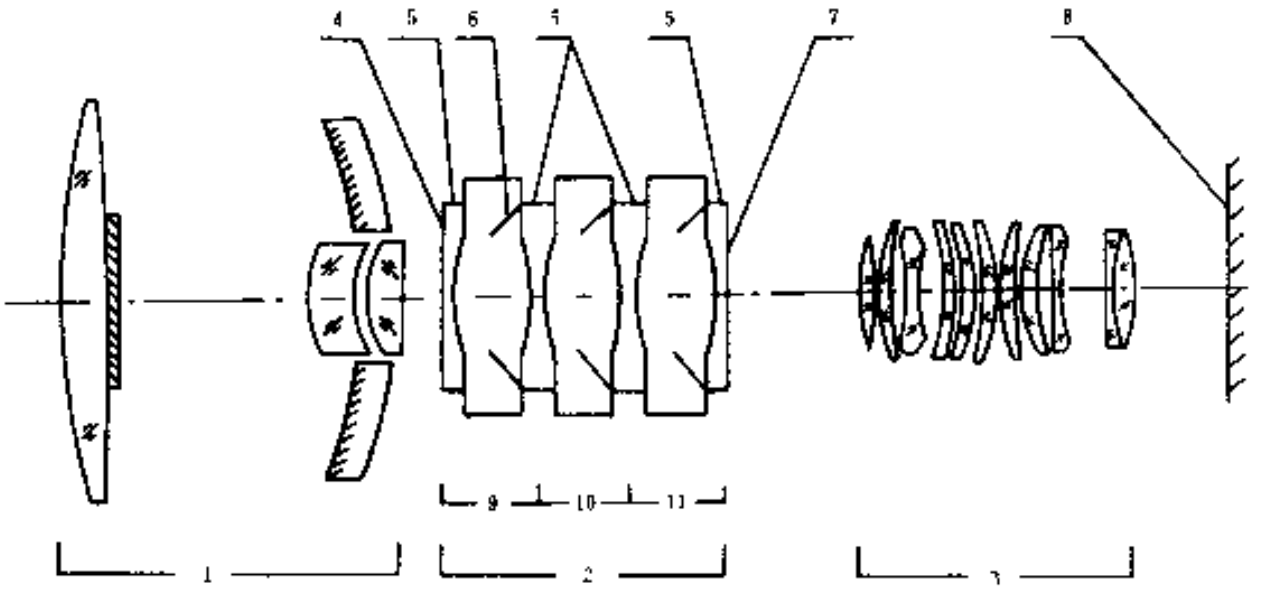
由于月光、星光的照度很低，因而不借助人工光源几乎无法用普通摄影镜头进行正常摄影。

夜视摄影镜头之所以能在夜间正常摄影，是因为其内部设计有独特的“电子影像增强器”。它一般由三级微型组件串联而成，每级微型组件各是一个光电放大器（内有电子透镜），其前端面为光电阴极面，后端面为荧光屏面。相邻两组件之间为光导纤维板（光导纤维直径为 5 ~ 6μm），起传导光线作用。第一组件前方也有一光导纤维板，该板左端为平面（物镜所会聚的景物影像即结在该平面上，故又称入射面），右端为曲面，此光导纤维板的作用是把物镜所结成的平面像，转换为球面像后，传递到第一组件的球面形光电阴极面上。此时，光电阴极面上的各点即按照其所接受之入射光的强弱程度，发出相应强弱的光电子。这些光电

子被组件内部的 10～15 千伏的高压加速后，向对面荧光屏面进行轰击，使荧光屏面上的各点受激励而发出相应强弱的光束。由于光电子被高压加速的结果，使荧光屏面的平均亮度比入射面提高了几十倍。于是，荧光屏面就产生出被显著增强了的景物影像。总之，物镜会聚的景物影像依次被三级微型组件增强后，呈现在第三级的荧光屏面上，然后由其后方的光导纤维板再把该球面像传递到其右端的出射面处，并还原为平面像。光线经三级微型组件递增放大后，其光强可增大到几万倍。从而可把自夜间景物投射来的人眼无法感知的极其微弱的光线，几乎放大到相当于与白昼一样。于是，原本无法使胶片感光的微弱光线，经影像增强器的放大后，可达到使胶片正常感光的程度。

图 4—28 所示为德国产蔡司 N·米罗塔（N·Mirota）夜视摄影镜头。该镜头由前方的折反射式物镜（焦距 210 毫米，1∶1.4，为四组四片式结构，调焦距离为 20 米～∞），中间的影像增强器与后方的中继镜头（微距镜头）三部分组成。摄影时，折反射式物镜将远处景物反射过来的微弱光线会聚后，投射到影像增强器的入射面上，影像增强器将接受到的影像进行三级光电放大，使该光线显著增强以后，自出射面投射出来，中继镜头就将影像增强器出射面的影像会聚到感光胶片上，使胶片平面结成被摄景物的有足够照度的清晰影像。上述影像增强器的作用结果，使该夜视摄影镜头的实际最大相对孔径相当于 1∶0.03。

由于最大相对孔径 1∶0.03 比 1∶1.4 约大 11 级光圈，故蔡司 N·米罗塔夜视摄影镜头的光通量约是原 1∶1.4 摄影镜头的 2500 倍。正因如此，当使用 ASA100 的感光胶片摄影时，蔡司 N·米罗塔夜视摄影镜头在明亮月光下（照度约为 0.1 勒左右），可采用约 1/125 秒的快门时间拍摄；在较淡的月光下（照度约为 0.01 勒左右），可采用约 1/15 秒的快门时间拍摄；在无月的晴朗星光下，可采用约 1 秒的快门时间拍摄。若换用高感光度胶片，所采



1. 物镜　2. 影像增强器　3. 中继镜头　4. 入射面
5. 光导纤维板　6. 电子透镜　7. 出射面　8. 胶片平面
9. 第一级　10. 第二级　11. 第三级

图 4—28　蔡司夜视摄影镜头

用的快门时间还可相应提高，从而能拍摄下运动体的清晰影像。

该镜头安装 2 节 5 号干电池可工作 30 至 40 小时，按下手柄左侧的开关至能听到蜂鸣声，且取景屏已发绿后，即可开始拍摄。

镜头内有电子保护电路，以防因接受到的光线太强而烧毁影像增强器的光电面。

日本富士公司生产的富士侬 FNS-P101 型夜视摄影镜头，其折反射式物镜的焦距为 200 毫米、1:1.5，可自 15 米至无限远调焦；该夜视摄影镜头可将被摄景物的微弱光线放大约五万倍。富士侬 FNS-C102 型夜视摄影镜头的物镜可随摄影者需要进行更换，以便获得摄影者所需要之相应焦距的画面效果。

使用夜视摄影镜头时应注意以下几点：

1. 严禁在阳光下和白天的室内使用。

2. 夜间摄影时应避开较近的明亮被摄体，以及路灯等发光体，否则夜视摄影镜头中的影像增强器将有损伤的可能。

3. 在不拍摄时，应装箱搬运，并轻拿轻放，避免震动。

4. 应注意避免在雾天使用，尤其应防止雨滴落在镜头上。

5. 不使用时应及时取出内装电池。

6. 储存时，最少每月通电一次，每次需通电约 10 分钟。

7. 为获得更理想的夜视摄影效果，一般建议使用 ISO 400 等高感光度的胶片拍摄。

目前，夜视摄影镜头被广泛应用于军事、侦破、科研、新闻等照相、电影、电视领域。

十一、闪光摄影镜头（GN AUTO）

闪光摄影镜头是既可快速进行闪光同步摄影，又能进行普通摄影的摄影镜头。

电子闪光灯的闪光指数 GN 一般是确定的，当实际调焦距离值与光圈数值的乘积等于该 GN 指数时，闪光摄影才能实现正确曝光。为此，在使用非自动调光型老式 X 闪光灯进行闪光摄影时，若改变调焦距离，则必须立即相应改变光圈数值（新型自动调光电子闪光灯例外）。因此，摄影中操作繁琐，分散精力，不利于进行抓拍。

闪光摄影镜头上有一 GN 调节环，环上刻有 GN 标尺刻度。拍摄时应按所用电子闪光灯的闪光指数值，将 GN 调节环拨至相应刻度上，此后再拍摄时，一旦转动调焦环，该镜头的光圈数就跟着相应改变：距离增大时，光孔自动开大；距离移近时，光孔又自动缩小，从而可始终保证正确曝光。此类摄影镜头操作简便、迅速，便于抓拍。但调焦时应注意距离不可太远，以免所需光圈超过该摄影镜头的最大光圈。

常见闪光摄影镜头有：日本产尼柯 45 毫米 F2·8 闪光摄影镜头，托普康（TOPCON）REGN 50 毫米、1:1.4 闪光摄影镜头。

十二、变形宽银幕电影摄影镜头（Anamorphic Shooting）

35毫米普通电影画面的宽高比为1.375:1，35毫米变形宽银幕电影放映画面的宽高比为2.35:1。

变形宽银幕电影由于放映银幕很宽，以至于远远大于人眼水平视角所能观看到的范围，明显扩大了观众的视野，使观众感到所放映的景物很宽阔，符合人眼在日常生活中所看到的“景物原本没有框界”的视觉效果，从而使观众在心理上明显加强临场真实感，并可显著提高电影画面的艺术表现力和感染力。而且宽银幕也比较符合人眼水平视角明显大于垂直视角的视觉特点。显然，变形宽银幕画面特别适宜拍摄庞大的复杂场面（如战斗场面、大型群众场面），以及拍摄美丽、雄伟的自然风光。

变形宽银幕电影摄影镜头为整体式结构，不能随意分解，这是与“变形套镜”的最大区别。此类镜头主要有定焦距式和变焦距式两种。

定焦距变形宽银幕电影摄影镜头一般由两部分组成：位于前方的柱形透镜组和位于后方的主摄影镜头。前者可将来自被摄景物的成像光线沿水平（横）方向压缩1/2（而高度不变），然后才经主摄影镜头在像平面处结成被压扁而变成细长状的景物影像（例如，使圆形物体在底片上变成竖立的椭圆形）。后者一般为高斯型摄影镜头，起主要成像作用（例如日本有的光学公司生产的35毫米变形宽银幕电影摄影镜头，其主镜头为英国产柯克定焦距35毫米电影摄影镜头）。图4—29中所示为德国阿莱（ARRI）公司与艺视高（ISCO）光学公司联合研制的焦距50毫米、1:2的35毫米变形宽银幕电影用定焦距摄影镜头。

35毫米变形宽银幕电影用变焦距摄影镜头，其柱形透镜组一般位于镜头后部。图4—30中所示为10×25型35毫米变形宽

银幕电影用变焦距摄影镜头。该镜头系由长春光机所和长春二光厂共同设计出的。其焦距为 25～250mm，母线方向光圈为 F3.2～32，垂直母线方向光圈为 F6.4～64。该镜头为 15 组 22 片式光学结构，其中左数 1 至 3 片为调焦组，4 至 6 片为变倍组，7 至 10 片为补偿组，14 至 17 片为柱形透镜组。该柱形透镜组刚好位于 11 至 13 片和 18 片至 22 片两后组透镜之间。

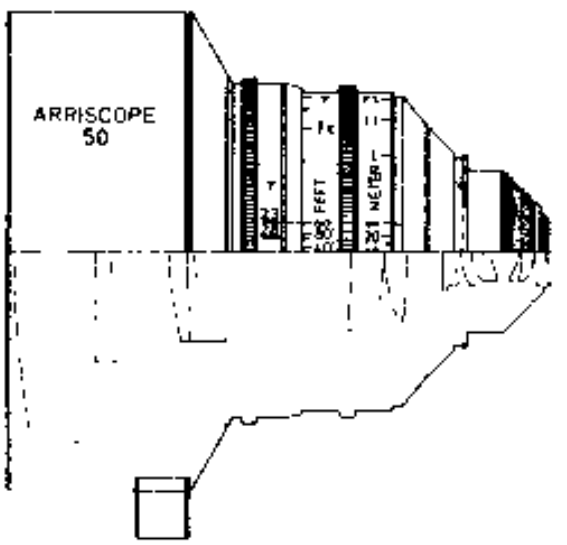


图 4—29　ARRISCOPE 变形宽银幕电影摄影镜头

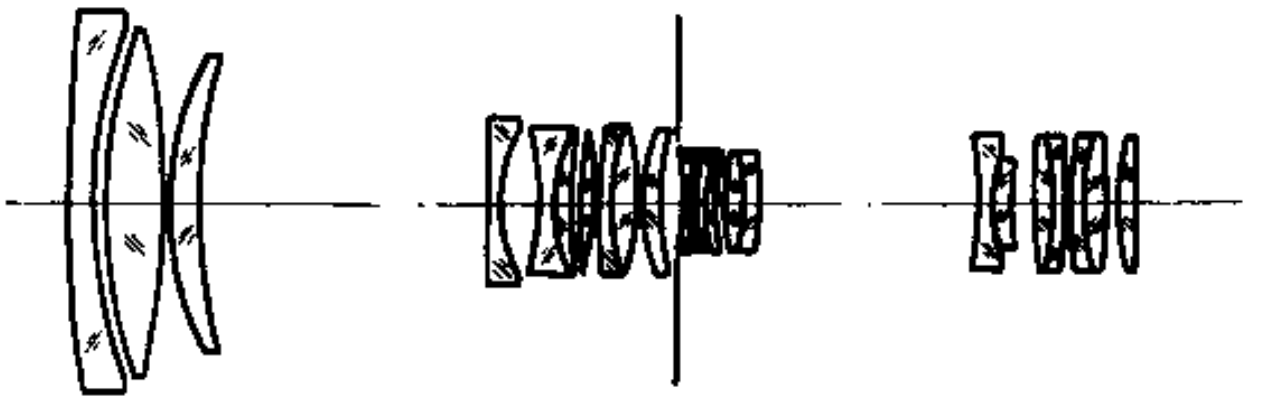


图 4—30

不同变形镜头中柱形透镜组的光学结构一般不同，如图 4—30 为二组四片式光学结构，日本产柯瓦（Kowa）牌、焦距 40、50、75、100 毫米变形镜头中的柱形透镜组，均为二组五片式结构。

十三、立体电影摄影镜头（Stereoscopic Photography）

人眼在观看同一景物时，左眼与右眼之间的间距（亚洲人平均为65毫米，欧洲人平均为67毫米），将使两眼获得有水平视差的两不同影像。该两影像经人大脑的综合处理后，可使人产生立体视觉——三维视觉。立体电影正是利用人眼的上述生理现象，使戴着特殊眼镜的观众在观看银幕上的影像时，产生身临其境的立体视觉和强烈的纵深感。

拍摄立体电影时，同时自水平间距为65～67毫米的左右两视点，针对同一景物各拍摄一组画面。放映立体电影时，把同时拍摄的两组画面同时放映到同一银幕上，并采用技术手段使观众左眼只能看到原先自左侧视点拍摄的画面，使右眼只能看到原先自右侧视点拍摄的画面，于是双眼的不同视觉经人大脑的综合作用后，使观众产生了立体视觉——观众仿佛置身于景物之中，产生伸手可触之感，那些迎面而来的快速运动体更使人产生将被击中的紧张情绪。

目前应用最为广泛的是偏振光立体电影。此法要求放映时在放映镜头前安装偏振镜，且自左、右两视点所摄之两组画面前的偏振镜，其偏振方向应彼此垂直。观众也需戴上偏振方向互为垂直的两片偏振镜，以便使观众左（或右）眼只能看到原先自左（或右）视点拍摄的画面。

按立体电影的摄制方法分类，常见有双机法和单机法两种。

双机法系指拍摄时使用两台水平间距（指二摄影镜头光轴的间距）为65～67毫米的电影摄影机，同时进行拍摄。我国早期制作的立体电影影片即是采用此法摄制的。放映时亦为双机放映（国内七十年代改为将两条底片印制在同一放映拷贝上，采用单机放映）。此法需要两台摄影机、两条底片，故不够经济；而将

两条底片印在同一拷贝上，既需要精确的技术，又耗费时间。

单机法系指拍摄时使用一台电影摄影机，借一套光学系统，从左、右不同视点拍摄同一景物，并均成像于同一曝光窗处，结成上、下两幅不同的画面。放映时，也用单机放映，并借助类似的光学系统将上、下两画面投影到同一银幕上。单机法的设备成本低，操作简便，节省胶片。

美国阿尔文·马克斯与莫蒂麦·马克斯，于 1974 年发明了图 4—31 所示单机法立体电影摄影光学系统。图中：1 消色差棱镜，2 垂直转向棱镜，3 水平偏振镜，4 棱镜，5 摄影镜头，6 垂直偏振镜、7 曝光窗、8 水平偏振镜、9 反光遮光器、10 垂直偏振镜、11 分光棱镜、12 水平转向棱镜、13 消色差棱镜、14 取景用偏振镜、15 取景磨砂玻璃。b 为左、右视点间距，θ 为有限远物点 P 发出的左、右成像光束的会聚角。

自物点 P 发出的一部分光线，经过左侧的消色差棱镜 1、垂直转向棱镜 2、水平偏振镜 3 后，变为沿水平方向振动的偏振光，然后再经过棱镜 4，被摄影镜头 5 会聚后，通过水平偏振镜 8，在曝光窗 7 下半部位的胶片处，结成景物的清晰影像。自同一物点 P 发出的另一部分光线，经过右侧的消色差棱镜 13、水平转向棱镜 12、垂直偏振镜 10 后，变为沿垂直方向振动的偏振光，然后再经过分光棱镜 11，射向摄影镜头 5，被镜头 5 会聚后，通过垂直偏振镜 6，在曝光窗 7 上半部分的胶片处，结成景物的清晰影像。由于水平偏振镜 8 可阻止垂直方向振动的偏振光，使之不能通过，所以自右侧消色差棱镜 13 进入的光线，无法在曝光窗下方结成影像；同理由于垂直偏振镜 6 可阻止水平方向振动的偏振光，使之不能通过，所以自左侧消色差棱镜 1 进入的光线，不能在曝光窗上方结成影像。

当被摄物体的调焦距离不等时，转动调焦钮既可拨动摄影镜头 5 的调焦环使之绕 Z_1 轴转动，又可通过齿轮变速器使分光棱

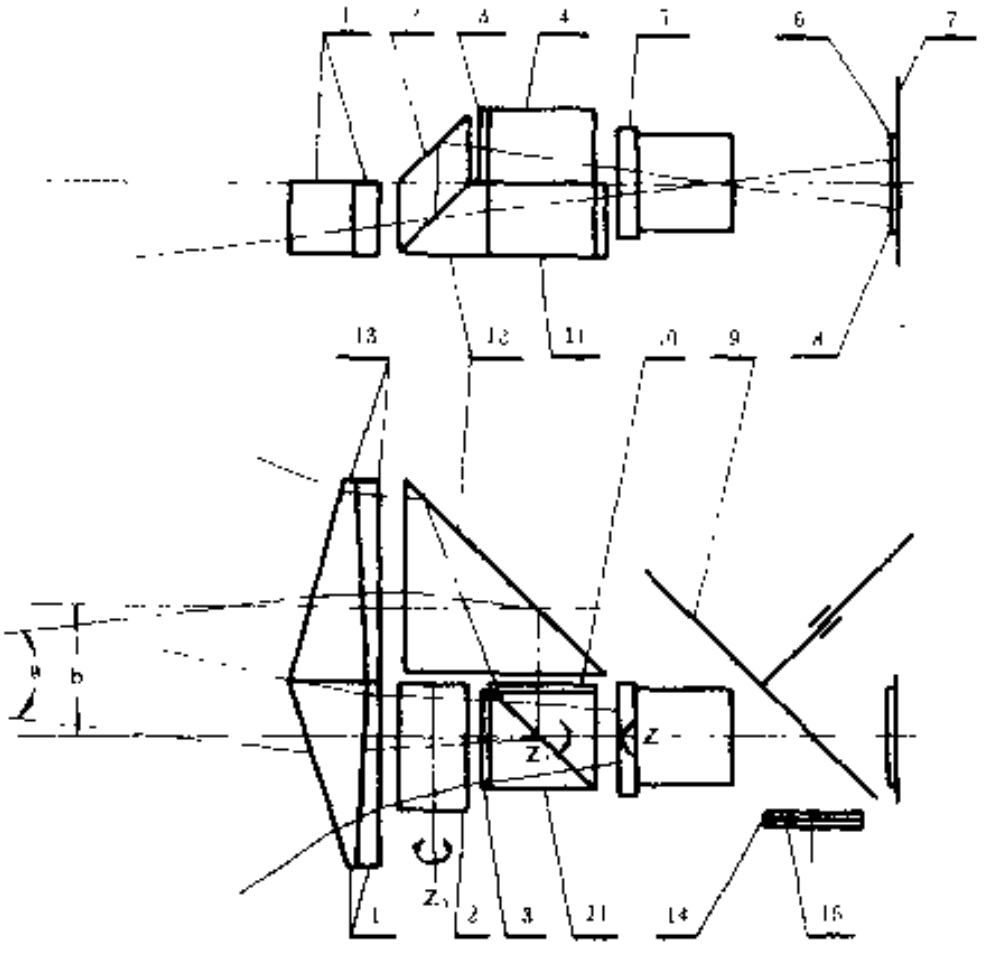


图 4—31　偏振镜式立体电影摄影镜头

镜 11 绕轴 Z_2 作相应偏转，以使光学系统的会聚角 θ 与被摄主体的远近位置相符合。例如，当调焦距离为 ∞ 时，$\theta = 0°$；当调焦距离为 1 米时，$\theta = 4°$。调节垂直转向棱镜 2 使之绕 Z_3 轴偏转时，可以调节左侧影像相对画幅水平中心线的上下位置，以使左、右影像的垂直位置一致。

图 4—32 所示为北京 608 厂生产的立体电影摄影镜头。图中 1 为摄影镜头、2 为中心片门、3 为左右镜头水平间距调节钮、4 为场镜、5 为棱镜组、6 为棱镜箱体、7 为 1 倍转像镜、8 为调焦环、9 为调焦标线、10 为感光胶片、11 为调焦基点、12 为左右镜头垂直间距调节钮、13 为摄影镜头座。该摄影镜头由于不采用偏振镜，因而影像亮度远比图 4—31 所示的镜头明亮。

608 厂生产之立体电影摄影镜头的左、右摄影镜头（图 4—

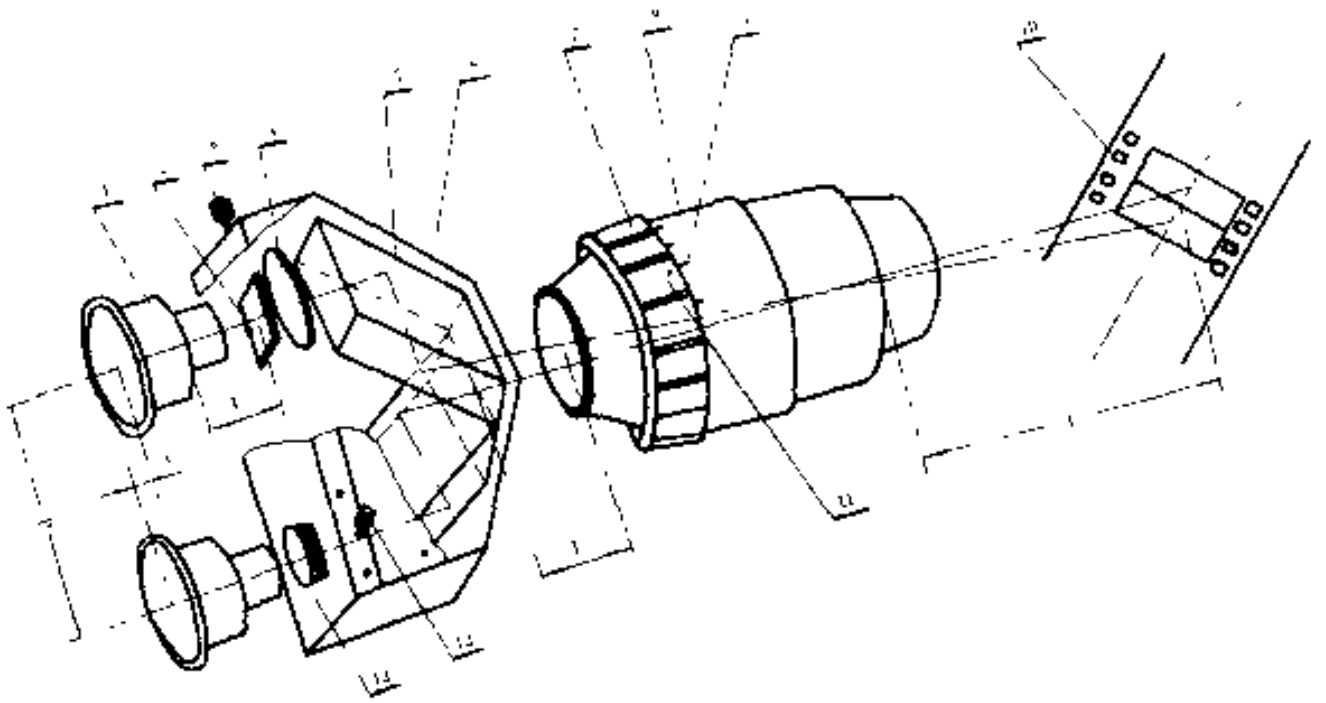


图 4—32 空间分光式立体电影摄影镜头

32 中 1)，共有五种规格可供选用：焦距 20mm、F1.4，28mm、F1.4，35mm、F1.25，50mm、F1.3，85mm、F1.4。图 4—32 中 A 为左右两摄影镜头之光轴沿铅垂方向（即高度方向上）的间距，B 为左右两摄影镜头之光轴沿水平方向的间距。

著名的立体电影《十三妹》即是采用北京 608 厂所生产的上述立体电影摄影镜头摄制而成的。

十四、组合摄影镜头

组合摄影镜头为由可以分解开的几大独立光学部分组合而成的结构特殊的摄影镜头。这些分解开的各光学部分可通过改变其彼此的前后相对位置，尔后重新组合在一起使用，甚至可以卸下其中的某一部分后，仅使用其余部分单独进行拍摄。而上述所采用的具体不同组合状态，将使实际安装的光学部分具有不同的具体焦距值。

1920 年德国迈尔（Meyer）工厂生产出了世界上第一只组合

摄影镜头，称为普拉斯马特（Doppel plasmat）镜头。该组合摄影镜头属于对称式正光摄影镜头，最大相对孔径为 1:4.5，供拍摄 6 英寸画幅的照相机使用。此组合摄影镜头由前后二组光学部分组成，当二组同时使用时，整个光学系统为焦距 155mm、1:4.5 的摄影镜头；当卸下后组仅使用前组时，整个光学系统变为焦距 220mm、1:8 的摄影镜头；当卸下前组仅使用后组时，整个光学系统变为焦距 320mm，1:9.5 的摄影镜头。

德国罗敦司特（RODENSTOCK）光学公司生产的二只西罗那（MAKRO-SIRONAR）微距摄影镜头也属于组合摄影镜头。二者分别为焦距 210mm、1:5.6 与焦距 300mm、1:5.6。

这二只微距摄影镜头均由前镜筒、主镜筒与后境筒三大部分共同组成，其中在主镜筒内有光圈与快门机构，在前、后镜筒内各固定有二组三片式光学透镜（但前、后镜筒内之透镜的结构尺寸不同）。在该前镜筒上刻有 1/3 ×…1 × 的标记，而在后镜筒上刻有 1 ×…3 × 的标记。若将前、后镜筒分别安装在主镜筒的前、后两端，则用该摄影镜头摄影时可获得影像放大率为 1/3 倍至 1 倍的影像；若将前镜筒安装在主镜筒后端，把后镜筒反而安装在主镜筒前端——此即相当于将该摄影镜头的光学系统前后颠倒 180°（倒装），则用该镜头摄影时可以获得影像放大率为 1 倍至 3 倍的影像。

德国莱兹公司近年生产的莱卡 APO-TELYT-R MODULES 系列长焦距摄影镜头，亦为组合摄影镜头。该系列共含 2 个前镜组（Lens Head）与 3 个后镜组（focus Module）。每个前镜组与一后镜组相匹配，即可组合成一体积小巧的长焦距摄影镜头。共可组合成焦距 300mm、F2.8，400mm、F2.8，400mm、F4，560mm、F4，560mm、F5.6，800mm、F5.6 等 6 只镜头。

十五、减震摄影镜头

自被摄景物投射来的光线经摄影镜头到达照相机的感光材料表面，在进行曝光的过程中，倘若摄影者的手产生了轻微抖动，则摄影镜头的轻微抖动，必将导致成像光线会聚在感光材料表面的位置，在曝光过程中亦产生相应移动，以至使所摄影像变虚，清晰度下降。

当使用焦距较长的摄影镜头在手持状态下拍摄时，倘若摄影镜头在曝光时抖动同样一角度，则摄影镜头的焦距愈长（视角愈窄，所拍摄的影像放大率也就愈大），其所摄画面的清晰度对摄影者握持照相机之手的轻微抖动就愈敏感，故此摄影镜头的焦距愈长，愈易于导致所摄影像清晰度的下降。

为了确保手持长焦距摄影镜头拍摄之影像的清晰度，摄影者应该选择更短的快门时间手持拍摄（为此所选快门时间的分母一般不应小于所用摄影镜头的焦距值），或者干脆把照相机固定在稳固的三脚架上进行拍摄。

每当拍摄环境要求在不允许用三脚架，且又不允许选择更短的快门时间（如光线太暗）的条件下用长焦距摄影镜头手持拍摄时，或当在摇晃的船上、汽车、火车等上拍摄时，摄影者需依靠专门的光学稳定器或机械减震器（如弹簧减震器、陀螺减震器）才能正常拍摄。只是在照相机上附加了上述稳定器或减震附件后，必将增大了照相机的体积，且这类减震附件也不便携带。

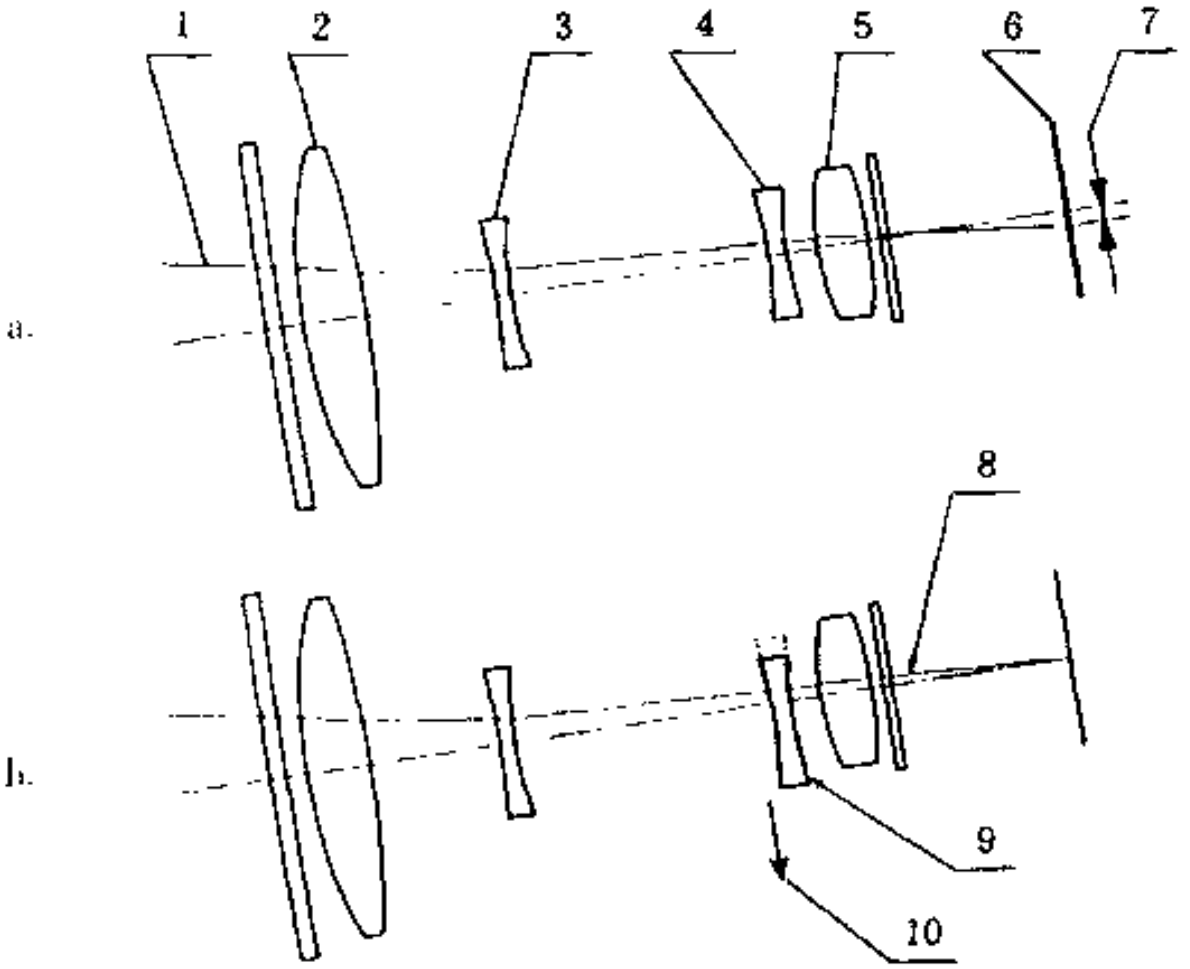
1995 年日本佳能公司生产出了本身已具备减震功能的独特的减震 IS（IMESTABILIZER）摄影镜头——EF75 – 300mm F4 – 5.6 IS USM 摄影镜头。此镜头采用 11 组 15 片的光学结构，其中第 4、5 组为减震补偿光学系统。摄影镜头的调焦工作由微型超声波马达驱动。此后佳能公司又先后推出了 EF300 F4 IS、EF28 –

135 F3.5－5.6 IS、EF100－400 F4.5IS、EF400 F2.8 IS、EF500 F4L IS、EF600 F4L IS 等款减震摄影镜头。

减震摄影镜头内设置有减震补偿光学系统，此系统与驱动线圈制成一体，并被置于磁路板处，一旦驱动线圈内有驱动电流流过，则线圈与磁路板上磁铁之间的作用，将使该减震补偿光学系统自动沿与光轴相垂直的相应方向上进行相应的精确移动。当减震功能关闭时，减震摄影镜头中的减震补偿光学系统将被减震锁锁定在该镜头光轴中心位置处，以供进行普通摄影。

佳能减震摄影镜头的减震工作原理如下：当接通摄影镜头上的减震功能开关（ON）并把照相机的快门钮按下一半时，减震补偿光学系统中的减震锁开启、镜头内检测该镜头抖动状况（该镜头抖动与否及抖动的方向与幅度大小）的二个震动传感器——角速度传感器（即震动陀螺仪）立即同时开始工作。当手持照相机拍摄中因手抖而导致摄影镜头抖动时，上述角速度传感器将立即把镜头沿上下、左右及其合成方向的具体角速度信息检测出来，并及时输入到该镜头内之 16 比特的微型计算机内。计算机针对所测角变量以及所用镜头的实际焦距值、实际拍摄距离值等进行高速运算，尔后把所得减震系统的最佳精确驱动信息传递给驱动电路，迅速驱动减震补偿光学系统相对摄影光路进行附加移动，以使因抖动而引起的感光材料表面上之影像的偏移得到反方向的相应补偿（例如 EF300mm F2.8L IS USM 减震镜头对感光材料处之影像的最大补偿偏移量可达 3 毫米）。从而实现当摄影中摄影镜头抖动时，仍能使所摄影像相对感光胶片的具体位置始终保持相对稳定不变的目的，并最终获得所期望的清晰影像。具体减震原理参见图 4—33 中所示。其中 a. 图为镜头前端向下抖动时的成像状态，b. 图为减震补偿光学系统补偿了上述手抖后的成像状态，c. 图为减震补偿系统的构成。

在上述减震补偿过程中，减震补偿光学系统的位置检测传感



1. 被摄景物投射来的光线 2. 前透镜群 3. 调焦透镜群
4. 减震补偿透镜群 5. 后透镜群 6. 胶片平面 7. 手抖模糊量
8. 补偿后的成像光线 9. 移位后的减震补偿透镜群
10. 补偿透镜群的补偿方向 11. 手抖补偿单元
12. 16 比特微型电子计算机 13. 胶片平面 14、15. 振动传感器

图 4—33 佳能减震摄影镜头工作原理

器（由二个红外线发光二极管 IRED 与二个位置检测元件 PSD 组成）及其检测电路，还同时对该减震补偿光学系统的具体被驱动状况进行同步检测，并及时将检测信息反馈到微型计算机内与原驱动信息进行比较，进而对控制减震补偿透镜移动值的驱动控制信息，进行精确的修正。这进一步提高了该摄影镜头的减震、稳定精度。

一旦摄影者自取景器中观察到的的影像状况稳定后，摄影者即可把快门钮按到底进行拍摄。

上述减震功能可对 0.5～20Hz 频率范围之内的抖动进行补偿。减震控制以 1/10000 秒的间隔连续进行。当全松开快门钮时，上述减震锁立即将减震光学系统仍锁定于光轴中心位置处。

日本尼康公司近日也生产出具有减震功能的 VR（Vibration Reduction）80～400 F4.5～5.6D ED 型减震摄影镜头。此 5 倍变焦功能的减震摄影镜头，采用 7 组 11 片的光学结构，并采用了 3 片 ED 玻璃。光圈调节范围为 F4.5～32，最近调焦距离为 2.3m，滤光镜尺寸为 77mm，重量为 1340g。该摄影镜头的减震功能可允许摄影者在更长的快门时间下进行手持摄影，并仍可获得清晰的影像。在手持拍摄时，此款摄影镜头允许选用的快门时间比通常约延长 3 挡。例如，当变焦至 100mm 焦距手持拍摄时，一般最长只能选用 1/125 秒的快门时间，而该镜头可允许在 1/15 秒下进行手持摄影。此摄影镜头具有下列 2 种减震模式：其一为对胶片上的所摄影像与取景器中的取景影像同时具有减震功能，另一为仅对胶片上的所摄影像具有减震功能。显然，前者对电能的消耗较多，而后者较为省电。此外，摄影者在不需要时也可关闭上述减震功能。摄影镜头上还设置了自动调焦模式与手控调焦模式的转换开关 A/M。只是此款摄影镜头要求必须与尼康 F5 或 F100、F80、D1 型照相机机身配合使用时，才具有减震功能。

在同样条件之下手持摄影时，与普通摄影镜头相比，减震摄影

镜头相当于具有可允许延长 2～3 挡快门时间手持拍摄的性能(如当使用 300 毫米焦距挡拍摄时,可允许使用 1/60 秒快门时间拍摄),这既有利于在光线较暗的环境下进行正常摄影,又有利于在一般光线下使用更小的光圈以获得更大的景深,以及有利于使用较长的快门时间以获得运动体的具有更强烈动感效果的画面。

使用减震摄影镜头摄影时,应注意以下事项:

1. 把摄影镜头上的减震功能开关拨至接通挡(ON)后,每当将照相机快门钮按下一半,0.3 秒后减震摄影镜头的减震功能即开始启动,而达到稳定状态则约需 1 秒钟。故此摄影者应在确定摄影镜头已经进入稳定状态以后再进行拍摄。镜头减震功能的启动与照相机 AF 功能的启动同步。(倘若把佳能 EOS-1N 照相机的自选功能 CF-4 设定在用 AE 锁钮而非快门钮启动 AF 功能,则在半按快门钮时减震功能不能启动,需按下 AE 锁钮才能启该减震功能,EOS-3 例外)。

2. 在使用三脚架拍摄时,由于照相机反光镜快速升起而造成的云台的反作用震动,易使减震功能发生失误,故此请将摄影镜头的减震功能拨至关闭状态(OFF)。而佳能新式 IS 摄影镜头因设置有拍摄时镜头状态的自动检测功能,一旦将其安装在三脚架上后,摄影镜头将自动把减震补偿光学系统锁定在光轴中心位置处,以防止其误动作(但为了节省电能建议仍以采取关闭减震功能为佳)。

3. 当进行 X 闪光摄影时,请将摄影镜头的减震功能设定在关闭状态。

4. 使用 B 门摄影时,亦请将摄影镜头的减震功能设定在关闭状态。

5. 欲针对快速运动体进行追随拍摄时,或在剧烈晃动的交通工具上拍摄时,此款减震摄影镜头有时不能充分发挥其减震功能。

6. 减震摄影镜头的动力由机身的电源供电。假若拍摄每一

幅照片时减震功能工作的时间平均为 10 秒钟，则佳能镜头之减震功能所消耗的电能将使照相机的总电能比使用普通摄影镜头时约减少 30%。

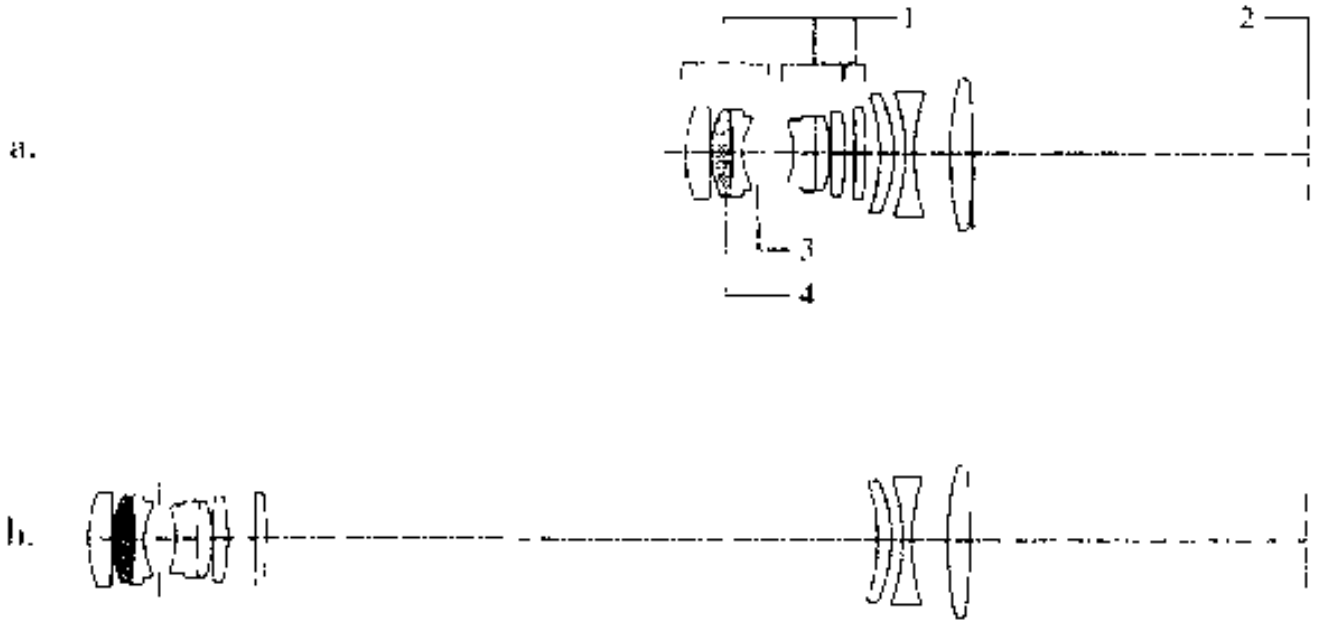
7. 由于受镜头与机身之间信息传递的影响，有些佳能机身当安装上减震摄影镜头时，在摄影后的瞬间，取景器内的影像出现晃动，此现象并不影响所摄影像质量。

十六、变倍近摄摄影镜头

近摄摄影镜头是专供在极近距离处进行拍摄，以获得很高影像放大率的专用摄影镜头。微距摄影镜头的特点是通过调节调焦环可以迅速自普通摄影状态调至微距摄影状态，但其最大摄影倍率相对较小，一般最大仅达 1:1 倍。近摄摄影镜头与微距摄影镜头的最大差异是，它不能针对无限远等普通距离下的景物拍摄，但其最大摄影倍率很高。

佳能公司于 1999 年问世的 MP－E 65mm F2.8 L－5× 型变倍近摄摄影镜头的光学结构为 8 组 10 片式结构，如图 4—34 中所示。图 a 为该摄影镜头调节至影像放大率为 1 倍时各镜片的相对位置图，图 b 为该摄影镜头调节至影像放大率为 5 倍时各镜片的相对位置图。

MP－E 65mm F2.8 L－5× 型变倍近摄摄影镜头的第二片透镜采用低色散玻璃（UD）制成，这使高影像放大率下拍摄时所残存的色差（二级光谱）得到了良好的校正。此外，该摄影镜头的摄影倍率改变采用了“3 群浮动方式”的结构，即摄影镜头的第 1、2、3 片透镜为 1 群，第 4、5、6 片透镜为 1 群，第 7 片透镜为 1 群，通过三群透镜的各自移动实现摄影倍率的改变。此种光学结构改进了超近摄影时的成像质量，使摄影镜头具有了敏锐、优异的结像力。



1. 调焦透镜群 2. 胶片平面 3. 光圈 4. UD 玻璃透镜

图 4—34 MP-E 65mm F2.8 1-5× 型变倍近摄摄影镜头

正由于此款摄影镜头不需要借助近摄接圈或近摄皮腔等附件，即可通过改变各透镜组彼此的间距来实现高倍率的近摄，同时镜头上采用了电磁驱动光圈及全电子镜筒接口，故此该镜头易于实现自动光圈的连动。这使得该镜头可实现自动光圈下的连拍，若再配合使用配置了激光磨砂玻璃调焦屏的照相机（如 EOS-1N），则还可通过 TTL 方式测光实现 AE 摄影。而加接近摄接圈或近摄皮腔进行高倍近摄的传统方式，若需要用较小光圈拍摄，则在开大光圈调焦后，尚需要手动调节光圈，操作时远为费时，费事多了。

此摄影镜头采用 2 段式伸缩镜筒，故此既获得了高伸缩率的镜筒全长，又实现了体积的小巧玲珑。该镜头还配置了微距 X 闪光灯。以供进行闪光近距摄影。

十七、柔化衬景摄影镜头 STF

日本美能达公司近来生产出一款新型特殊摄影镜头——STF

（Smooth Trans Focus）135mm F2.8（T4.5）柔化衬景摄影镜头。该镜头采用6组8片式光学结构。

美能达公司这款柔化衬景摄影镜头STF的最大特点，是在摄影镜头的第四组透镜处设置了一片独特的中心透明式中性密度径向渐变滤光镜。该滤光镜中心部位呈完全透明状态——密度为零，而中心部位的四周呈密度渐变状态——滤光镜的密度沿着半径方向向外缘由小逐渐增大，从而逐渐呈现为浅灰色状态。故此，该中性密度径向渐变滤光镜的透光率，自中心部位开始沿半径方向逐渐降低。也正由于该滤光镜属于中性密度渐变性质，故此其并不影响所摄画面的色彩还原。该中性密度径向渐变滤光镜与第四组透镜组成变迹法（APODIZATION）滤光透镜组。

柔化衬景摄影镜头STF的另一特点是在摄影镜头第3组与第4组透镜之间的普通自动光圈（由9片叶片组成）前方，紧邻着增设了一组呈圆形光孔的手动辅助光圈（由10片叶片组成）。该辅助光圈可进行连续调节。在调节过程中，辅助光圈中心的通光孔的形状始终为圆形，而非多边形，故此点光源所成弥散光斑的形状非常圆滑。而多边形光孔之点光源的弥散光斑往往呈现出棱角状的外形，且容易在光斑周围出现辐射状光芒。

该摄影镜头在镜筒上刻有T数光圈调节基线，而在光圈调节环上刻制了下列五挡TNo刻度：A、4.5、5、5.6、6.7。

其中A挡为普通自动光圈挡。当调至A挡后，摄影镜头可供进行全开光圈取景与测光，并在按下快门钮后进行自动光圈曝光。其自动光圈调节范围为T4.5—T32。

其余4.5—6.7各挡为T数标尺光圈挡。T数光圈为考虑了摄影镜头实际透光率τ后的光圈数，参见公式（3—10）中所示。

摄影者在拍摄时，只能自上述二类光圈中选择其一工作，二者不能同时进行工作。当调节至T数光圈诸挡位置处时，摄影镜头的光圈只能手控连续调节，而不再具有自缩光圈功能——调节

到哪一挡时光孔大小就同时精确变至该挡大小。

柔化衬景摄影镜头的拍摄效果有别于普通摄影镜头的拍摄效果：当摄影者对位于某确定距离处的被摄主体调焦时，位于被摄主体前、后两方的景物——衬景，均将在感光胶片平面处结成弥散光斑。普通摄影镜头所结成的上述弥散光斑的亮度比较均匀，故此使用普通摄影镜头拍摄时，被摄主体周围的前、后景物——衬景，在画面上之影像的虚化效果将比较生硬。而柔化衬景摄影镜头 STF 所结成的弥散光斑却是中央亮度较高，周缘亮度逐渐下降的独特光斑。故此用柔化衬景摄影镜头拍摄时，画面中的衬景将呈现为圆润、柔和、朦胧的虚化效果。

柔化衬景摄影镜头的拍摄效果又有别于普通柔焦摄影镜头的拍摄效果：使用普通柔焦摄影镜头拍摄时，整幅画面所获得的柔和影调，是由于不但衬景影像被摄影镜头柔化，而且被摄主体的影像也一同被柔化的结果——整幅画面的清晰度均明显降低。而柔化衬景摄影镜头则不然，其是在确保被摄主体仍能获得其相应清晰锐利影像的同时，仅仅使衬景部分的影像被圆润地柔化。

总之，柔化衬景摄影镜头通过所采取的中性密度径向渐变滤光镜与圆形光孔二项技术，使得所摄画面中的被摄主体影像清晰锐利，同时前后衬景圆滑地朦胧虚化。从而通过虚实对比既突出了被摄主体，使之在画面中显得益发清晰、醒目，同时又使所摄画面的影调显得更为柔和、圆润、清新、淡雅、生动、感人。

思 考 题

1. 常见普通摄影镜头的种类与各自特点？
2. 常见特殊摄影镜头的种类与各自特点？

第五章　摄影镜头的光学结构类型与性能

摄影镜头的光学系统由若干片单片透镜、胶合透镜、甚至反光镜等组成。由于组成不同摄影镜头的各类镜片的数目、形状、尺寸等的不同，因而摄影镜头的光学结构类型很多，再加上设计构思和加工精度的不同，从而使不同镜头的性能和质量存在着差异。下面仅就比较典型的摄影镜头类型，及其性能特点予以介绍。

第一节　非对称型普通摄影镜头

光圈前、后两方的光学结构彼此不对称的摄影镜头，称为非对称型摄影镜头。常见非对称型普通摄影镜头有下列几种。

一、新月型摄影镜头

新月型摄影镜头是英国物理学家 W·H·乌拉斯顿先生于 1912 年发明的。当初为一凹面朝前的新月牙形凹凸透镜，光圈位于透镜前方。虽其光学结构最为简单，但成像质量较差，多用于儿童玩具照相机上。参见图 0—5 所示。

目前，在一些一次性照相机（Single-use Camera、Film With Lens 又称胶卷相机）上普遍采用改进型新月型摄影镜头。此改进型为一凸面朝前的新月牙形凹凸透镜，光圈位于透镜后方。参见

图 5—1 所示。为显著降低生产成本，改进型新月型摄影镜头一般用光学塑料经注塑加工而成。日本富士牌一次性照相机的摄影镜头的结构即为此改进型结构，最大光圈为 F8。

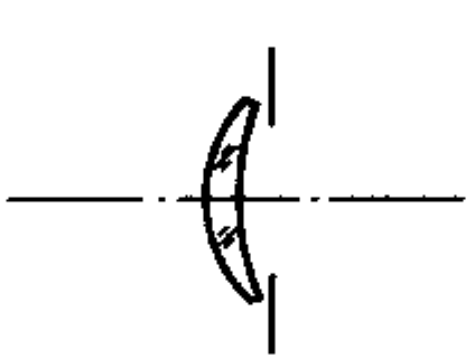


图 5—1 改进型新月型摄影镜头

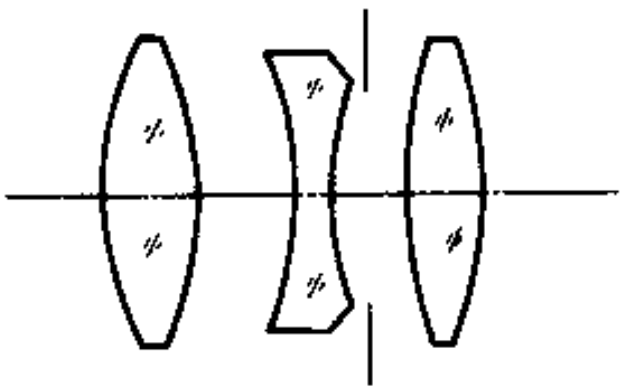


图 5—2 改进型三组三片式柯克镜头

二、三组四片式匹兹伐人像镜头（PETZVAL）

匹兹伐镜头是匈牙利著名数学家 J·M·匹兹伐（Joseph Max Petzval）先生于 1840 年设计的，它是世界上第一个用数学计算方式设计出来的镜头。参见图 0—7 中所示。其焦距为 100 毫米，最大相对孔径为 1:3.7。

匹兹伐镜头在最大相对孔径和校正像差方面均较前者有了明显提高，只是场曲略大，所以特别适用于进行人像摄影。自其问世直至 20 世纪初，匹兹伐镜头得到了广泛使用。目前的电影放映镜头中，仍有一些厂家采用匹兹伐镜头。

至 1878 年，出现了将后两组也胶合在一起的匹兹伐镜头的改进型。

三、三组三片式柯克镜头（COOKE TRIPLET）

三组三片式柯克镜头由英国泰勒·哈勃森公司（TAYLOR HOBSON）的 H·D·泰勒（H·D·Taylor）先生于 1893 年设计。该镜头由三片分立的透镜组成，前、后两片均为凸透镜，并均用钡冕光学玻璃制成，中间一片为凹透镜，由火石光学玻璃制成，光圈位于第一、二片透镜之间。图 0—8 所示。

不久，又设计出了改进型三组三片式柯克镜头——将光圈移至第二与第三组之间。如图 5—2 所示。目前光学界所说之三组三片式柯克镜头，均指改进型。

三组三片式柯克镜头属于正光摄影镜头。此镜头的光学结构是能够对全部六种像差进行校正的最简单结构，且成本低廉，因而在第二次世界大战前曾被各国摄影界广为采用，并为世界各光学工厂纷纷仿制。但它对像差的校正仍不完善。

三片式柯克镜头目前仅应用在普及型低档照相机上，例如，国产海鸥 203 型 120 照相机。海鸥 4A、4B、4C 型 120 照相机上的 HAIOU-31 型摄影镜头，也采用了此种结构。

四、三组四片式天塞镜头（TESSAR）

天塞镜头由德国卡尔·蔡司（Carl Zeiss）光学公司的鲁道大（P·RUDOLPH）先生于 1902 年设计。属于正光摄影镜头。天塞摄影镜头的光学结构与三片式柯克摄影镜头相似——其第一组同为一片凸透镜，第二组同为一片凹透镜，只是天塞摄影镜头的第三组为凹透镜和凸透镜胶合而成的透镜组，光圈位于第二、三组之间，当初的最大相对孔径为 1:5.6。如图 0—10 所示。

天塞镜头由于引入了胶合透镜，因而使三片式柯克镜头残存的高级像散和轴外球差得到了部分校正，从而使成像质量得到改善。其视场角也略为增大；特别适于风景摄影。由于天塞镜头结构尚比较简单，成本也略低，因而问世后被世界各国光学工厂广为仿制。

目前天塞镜头仍被广泛应用在一些普及型照相机和放大机上。例如。国产凤凰牌 205 牌 35 毫米旁轴取景的照相机所配置的摄影镜头，以及八十年代的国产东方牌 S4 型、虎丘牌 HQ351 型、牡丹 MD35A 型、海鸥 KJ－1 型 135 平视旁轴取景照相机的摄影镜头，长城牌 DF－3 型 120 照相机的摄影镜头，均采用了天塞型镜头结构。国外仿天塞型光学结构比较著名者为莱卡 135 照相机的埃尔玛（Elmar）摄影镜头。

五、三组五片式海里亚镜头（HELIOR）

海里亚镜头属于正光摄影镜头，由德国沃格兰德（Voigtländer）公司生产，它的光学结构是由三片式柯克镜头演变而来——将原第一组和第三组单片正透镜，均改为胶合正透镜组，光圈仍位于第二组与第三组之间。如图 5—3 所示。

海里亚镜头在天塞镜头的基础上进一步改善了轴外光束的成像质量，视场角也进一步增大，所以在航空摄影和人像摄影中得到较多的应用。

六、三组六片式松纳镜头（SONNAR）

松纳镜头最早由德国卡尔·蔡司公司的 L·别鲁太列先生设计。属于非对称型结构的正光摄影镜头。松纳镜头也是由三片式柯克镜头演变而成，其结构上的最大特点是第二组特别厚，常由

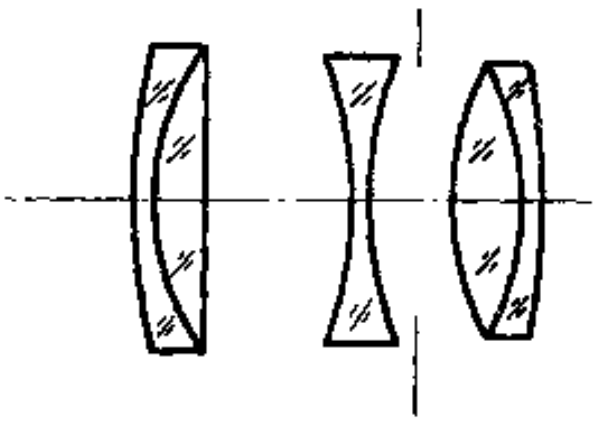


图 5—3　海里亚镜头

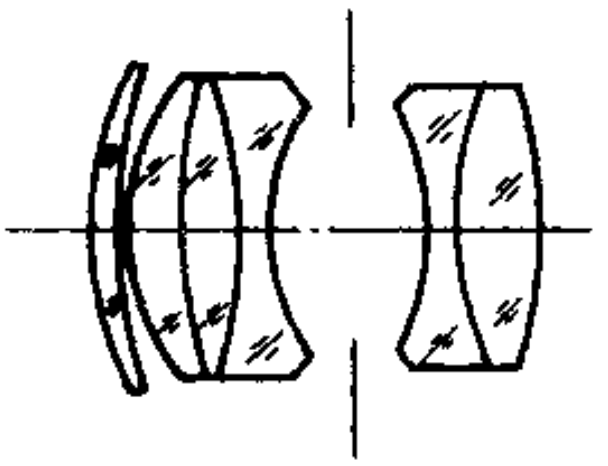


图 5—4　松纳镜头

三片透镜胶合而成。如图 5—4 所示。当初镜头的焦距为 50 毫米，最大相对孔径为 1:2。

原苏联基辅助 Юпитер-8、50 毫米、1:2 的摄影镜头即采用了松纳型光学结构。而 Юпитер-3 型 50 毫米、1:1.5 摄影镜头则为松纳型光学结构的改进型——该镜头为 3 组 7 片式结构，第一组、第二组与图 5—4 中第一、第二组相同，只是第三组为由“负透镜、正透镜、负透镜”三片透镜胶合而成。

松纳镜头对高级球差校正的效果较好，因而最大相对孔径很大。但因受色彗差等轴外像差的影响，为获得高成像质量，只使用其较小范围内的视场。

目前联邦德国卡尔·蔡司公司生产的松纳系列摄影镜头的光学结构，已包含了各种改进型，且均已良好地校正了色差等像差。目前松纳镜头多为大孔径、小视场角的中焦距摄影镜头。

七、四组六片式贝奥冈镜头（BIOGON）

贝奥冈镜头最早为德国卡尔·蔡司光学公司设计。它属于半对称型结构的正光摄影镜头。如图 5—8 所示。

贝奥冈镜头对像差较正得很好，视场角很大，最大相对孔径

也很大。

目前贝奥冈镜头多制成广角镜头。图 5—5 所示即焦距 35 毫米、1:2.8 的贝奥冈广角镜头。

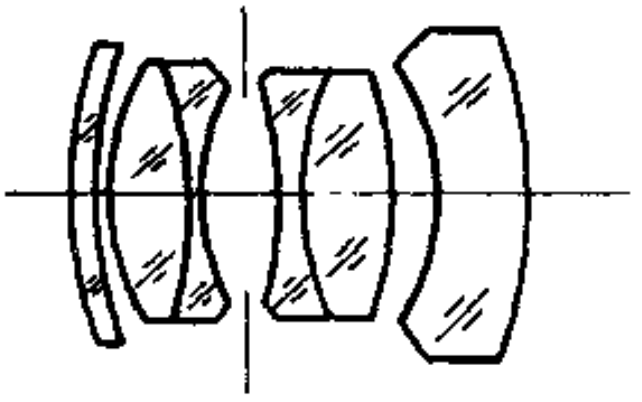


图 5—5　贝奥冈镜头

八、八组十二片式微距摄影镜头

图 5—6 中所示为佳能 EF 100mm F2.8 Macro USM 型微距摄影镜头的光学结构图。该摄影镜头为供 35mm 照相机使用的微距自动调焦摄影镜头（AF），可直接从对无限远拍摄状态，迅速连续调焦至最大摄影倍率达 1:1 的微距摄影状态，或反之。此摄影镜头的焦距为 100 毫米，最大相对孔径为 1:2.8，最小光圈为 F32，最近调焦距离为 0.31 米，滤光镜尺寸为 67 毫米，镜头的最大直径为 78.6 毫米，长度为 118.6 毫米，重量为 600 克。摄影镜头在等倍摄影时，仍可保证具有长达 149 毫米的前工作距离，故此便于布光与拍摄。

此摄影镜头采用 8 组 12 片式结构。为了更好地消除杂光，校正像差，进一步提高摄影镜头的成像质量，该摄影镜头除主光圈外还设计有一副光圈。

此款摄影镜头采用内调焦技术，摄影镜头除第 1、2、3 组透镜组为固定群外，第 4、5、6、7、8 组均为调焦组元。其中第 4、

5组为一群，第6、7组为一群，第8组单独为一群。调焦时上述三群光学透镜各自按照其各自不同的位移轨迹进行相应的联动位移，并协同实现精确的调焦控制，故此在整个变焦过程中像差的改变很小。此外由于采用了内调焦技术，在整个调焦过程中摄影镜头的长度不改变，且镜头前框不旋转，故此方便了偏振镜与专用方型滤光镜框座的使用，并方便了环形微距闪光灯（MR-14EX）的安装与使用。镜头采用环形超声波马达进行驱动、调焦迅速、安静，并可进行手控调焦。由于手控调焦环的转角范围很大，故此明显提高了手控调焦的精度。

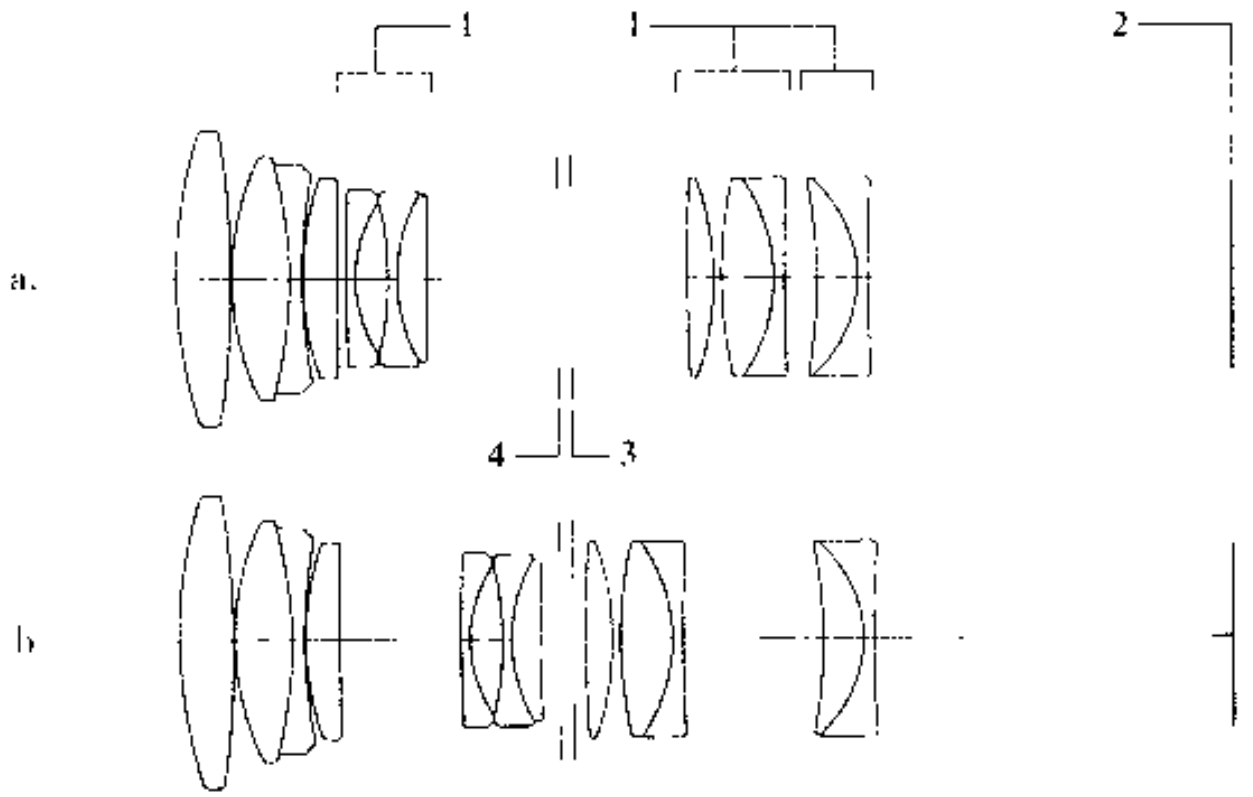


图 5—6　佳能微距摄影镜头

第二节　对称型普通摄影镜头

光圈前、后两方的光学结构彼此对称或基本对称的摄影镜头，称为对称型摄影镜头。此类镜头的光学结构对称性，可使其

能自动消除一些垂轴像差（如畸变、慧差、倍率色差等）。常见对称型普通摄影镜头有下列几类。

一、二组四片式快直镜头

1860年，德国的施泰因海尔（C·A·Steinheil）与美国的多尔迈耶（Dallmeyer）分别制成了阿波拉纳特（Aplanat）和快直（Rapid Rectilinear）摄影镜头。这二只摄影镜头均采用对称型结构，为二组四片式，第一、二片透镜胶合成一组，第三、四片透镜胶合成第二组，在两组之间装有光圈。如图5—7所示。

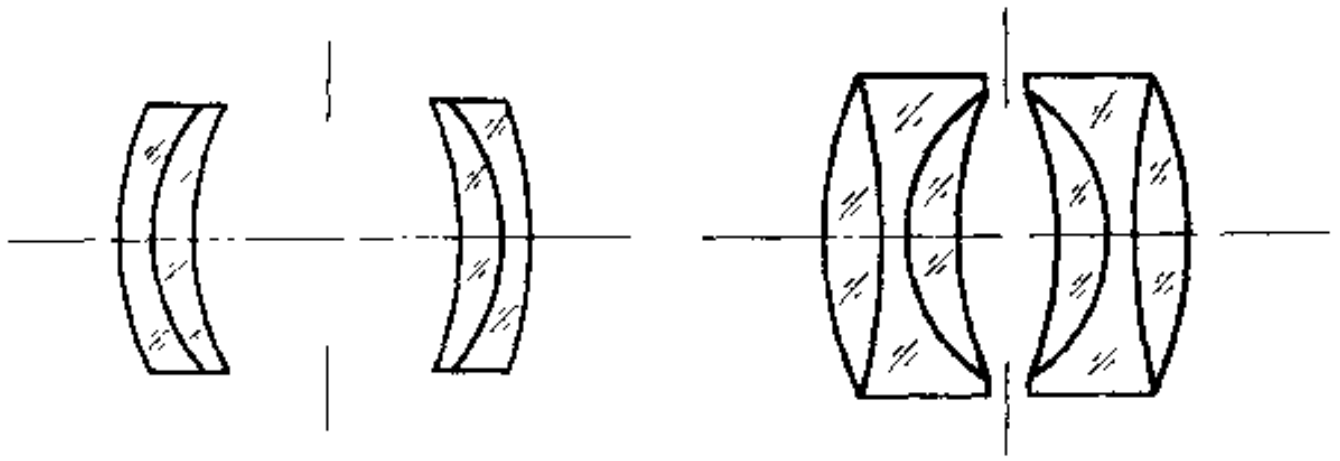


图5—7　二组四片式快直镜头　　图5—8　达格镜头

快直镜头对畸变和色差等像差校正得较好，虽然最大相对孔径仅1:8，但在当时已属大相对孔径的镜头了，所以早期曾得到广泛应用。

二、二组六片式达格镜头（GOERZ DAGOR）

1892年诞生的达格摄影镜头属于对称型结构的正光摄影镜头。它由二组透镜组成，每组各由三片透镜胶合而成，光圈位于

两组之间。如图 5—8 所示，该摄影镜头的最大相对孔径为 1:6.8。

由于达格镜头采用了对称型结构，因此很容易对垂轴像差作校正，并可获得一定的成像质量，属于正光摄影镜头。该镜头早期应用较为广泛。

三、四组六片式双高斯镜头（DOUBLE GAUSS）

双高斯镜头最早由德国卡尔·蔡司光学公司的鲁道夫（P·RUDOLPH）先生于 1896 年设计，并命名为普兰纳型（PLANAR）摄影镜头。（目前卡尔·蔡司公司生产的普兰纳系列镜头已包含各种改进型）。此镜头属于对称型正光摄影镜头。它由四组透镜组成，第一组和第四组均为单片凸透镜，第二组和第三组皆由凸透镜与凹透镜胶合而成，光圈位于第二、三组之间。如图 0—9 所示。早期双高斯摄影镜头的最大相对孔径仅为 1:6。

双高斯镜头的对称型结构很容易对垂轴像差作校正，并且使球差、像散、场曲、色差也得到了很好的校正，因而该镜头的成像质量很好。此镜头相对孔径很大、视场中等，但其结构比较复杂，成本较高。

由于双高斯镜头的上述特点，它被广泛应用于高档、中档照相机，以及专业电影摄影机的标准摄影镜头上。例如：莱卡 R4 型 35 毫米照相机的标准摄影镜头（SUMMICRON50 毫米、1:2），佳能新 F-1 型 35 毫米照相机的标准摄影镜头（新 FD50 毫米、1:1.8），国产海鸥 DF 型、孔雀 DF 型 35 毫米标准摄影镜头（58 毫米、1:2）。哈苏 500C/M 型 120 照相机的标准摄影镜头（PLANAR 120 毫米、1:4）；德国阿莱弗莱克斯ⅡC 型 35 毫米电影摄影机的标准镜头（PLANAR 50 毫米、1:2）、和平牌 S-35Ⅱ型 35 毫米电

影摄影机的标准镜头（35SJ-50 型 50 毫米、1:2）。

四、改进型双高斯镜头

为了进一步提高成像质量，增大最大相对孔径，近年来各光学公司纷纷在原双高斯镜头的基础上，推出了一批改进型双高斯镜头。

图 5—9 为一种复杂化的双高斯镜头——光路中在第四组透镜后方又新增了一组镜片，成为五组七片式的光学结构。德国阿莱弗莱克斯 35BLⅢ、4 型 35 毫米电影摄影机的标准镜头（PLANAR 50 毫米、1:1.3）即采用了如图 5—9 所示的复杂化双高斯摄影镜头。和平牌 S-35Ⅲ型 35 毫米电影摄影机的 35SJ—40（40 毫米、1:2）摄影镜头也采用了类似结构。

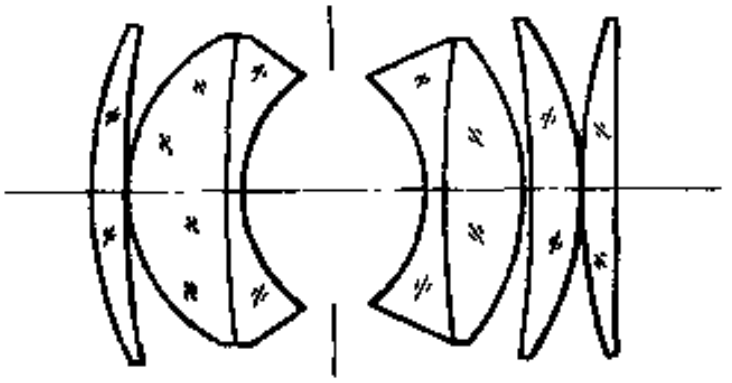


图 5—9 复杂化双高斯镜头

也有一些厂家在复杂化双高斯镜头的基础上继续进行改进，将其第二组胶合透境（如德国卡尔·蔡司光学公司生产的 PLANAR-T 50 毫米、F1.4 和 F1.8 镜头）或第三组胶合透镜分解为两彼此独立的透镜，从而演变出六组七片式光学结构。采用类似六组七片式结构的摄影镜头有：佳能 FD50 毫米、1:1.2 和 1:1.4 摄影镜头、潘太克斯 50 毫米、1:1.2、1:1.4 摄影镜头，和平牌 S-35Ⅲ型电影摄影机用长城 35DSJ-50（50 毫米、1:1.3）摄影镜头。

还有些厂家在普通四组六片式双高斯镜头的基础上进行改进——把第二组或第三组胶合透镜分解为两彼此独立的透镜，从而演变出五组六片式光学结构的摄影镜头。例如，美能达 50 毫米、1:1.7MD 和 1:2MD 摄影镜头，潘太克斯 M50 毫米、1:1.7 摄影镜头。

第三节　摄远型与反摄远型摄影镜头

一、摄远型摄影镜头

由位于前方的正组透镜系统与位于后方的负组透镜系统所共同构成，且两组透镜系统的间距小于正组透镜系统焦距的摄影镜头、称为摄远型摄影镜头。

摄远型摄影镜头属于长焦距镜头，视角较窄，其典型结构如图 2—2a 中所示。由于起发散作用的负组透镜系统位于后方，所以使该光学系统的像方主平面向前移，甚至移至镜头前顶点的前方，从而使该镜头的焦距远大于镜头的后工作距。

摄远型摄影镜头可在增长焦距、增大影像放大率的同时，使镜筒的长度减小、镜头结构紧凑、易于携带。摄远型摄影镜头的最大相对孔径较小。

图 5—10 为莱兹牌埃尔玛·R（ELMAR-R）180 毫米、1:4 摄远镜头的光路图。该镜头采用四组五片式结构，第一组由两片透镜胶合而成。前三片透镜构成了正组透镜系统，后二片透镜构成了负组透镜系统，光圈刚好位于第三、四片透镜之间。

图 5—11 为潘太克斯 A600 毫米、1:5.6ED（IF）型超摄远镜头的光路图。该镜头采用六组八片式结构，前四片透镜构成了前正组透镜系统，后四片透镜构成了后负组透镜系统，而光圈移至

后负组透镜系统的后方。此镜头为了明显改善影像质量，采用了低色散玻璃；为了减小镜筒长度，采用了内调焦结构。

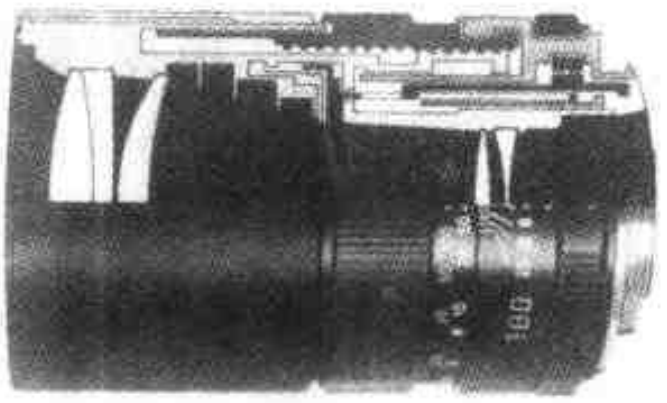


图 5—10　莱兹牌 180 毫米摄远镜头

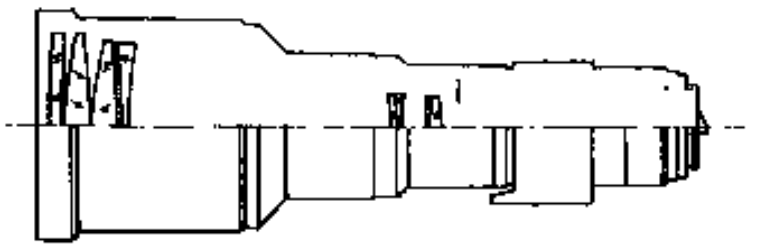
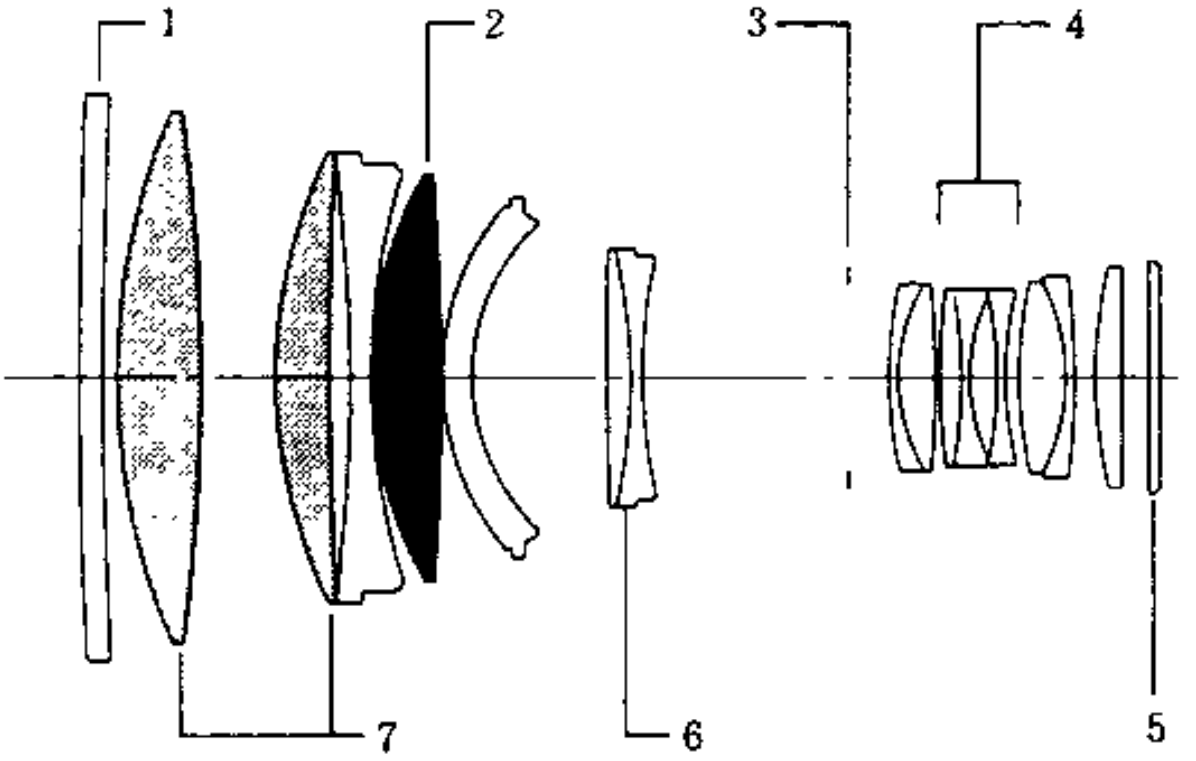


图 5—11　潘太克斯 A600 毫米超摄远镜头

图 5—12 中所示为佳能 EF300mm F2.8L IS USM 型专业用摄影镜头的光学结构图。该摄影镜头焦距为 300 毫米，采用 11 组 14 片结构。为了把像差校正到更高境界，进一步提高摄影镜头的成像质量，该摄影镜头第一片与第二片透镜采用低色散 UD 玻璃制造，第 4 片透镜采用萤石玻璃制造。由于低色散玻璃的硬度较软，易于被划伤，故此该摄影镜头的第一片透镜的前方设置有一片保护玻璃，以将第一片 UD 玻璃透镜与外界隔离开。此外在最后一片透镜后方设置了一片玻璃滤光镜。

此款摄影镜头采用内组调焦结构，还采用了调焦补偿光学组元，故此该摄影镜头的成像质量得到明显改善。由于此摄影镜头为了实现较大的最大相对孔径，第一片透镜的直径较大，故此摄影镜头设置了可装卸、更换的后置玻璃滤光镜。当使用此摄影镜

头时，摄影者不可一片滤光镜不如，也不可一次安装多片滤光镜拍摄，以免所摄影像焦点不实。



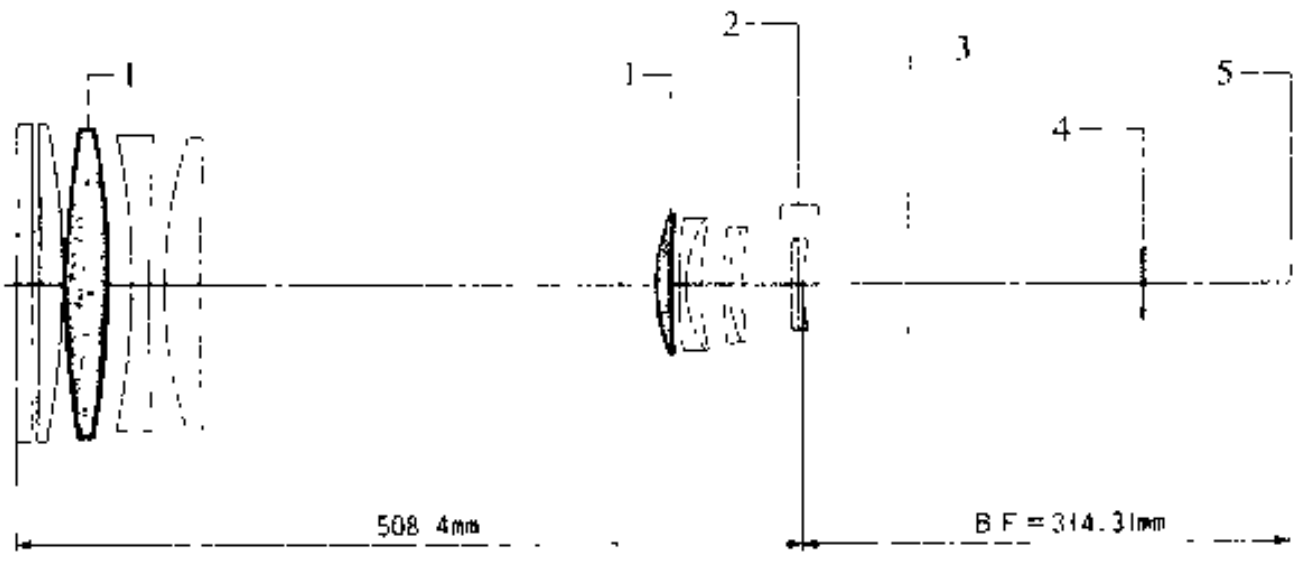
1. 保护玻璃　2. 萤石透镜　3. 光圈　4. 调焦补偿光学组元
5. 后置滤光镜　6. 调焦群　7. UD 玻璃透镜

图 5—12　EF300mm F2.8L IS USM 型摄影镜头

图 5—13 中所示为佳能 EF1200mm F5.6L USM 型专业用摄影镜头的光学结构图。该摄影镜头焦距为 1200 毫米，采用 8 组 11 片结构。为了进一步提高摄影镜头的成像质量，第二片与第五片透镜采用大口径的色散极低的萤石玻璃制造。

该摄影镜头最后一组为调焦组，光圈位于调焦组后方。光圈后方也有一片后置玻璃滤光镜，此外在第一片透镜前方也有一片保护玻璃。

由于采用了二片萤石玻璃，故此使超摄远摄影镜头拍摄时所残存的色差（二级光谱）得到了良好的校正，从而使得该镜头自最近调焦距离 14 米至无限远的全部调焦范围内，均具有较高品质的成像性能。此摄影镜头的电磁光圈由 8 片叶片构成，最小光



1. 萤石透镜　2. 调焦透镜群　3. 光圈　4. 后置滤光镜　5. 胶片平面

图 5—13　EF1200mm F5.6L USM 型摄影镜头

圈为 F32。镜头的最大直径为 228 毫米，最大长度为 836 毫米，重量为 16.5 客观。由此款超摄远镜头的长度可知，其具有优良的摄影比（镜头光学全长/焦距）——仅 0.7，显然，此款摄影镜头的体积相对较小，便于携带。

EF1200mm F5.6L USM 摄影镜头采用环形超声波马达进行自动调焦，并可手控调焦。手控调焦的速度共有 3 挡可供选择，计有 1/2（微调）、标准（正常）、2 倍（快速）三挡。为尽可能提高调焦效率，摄影镜头上还设有一调焦范围选择开关，计有 14～30 米、30 米～∞，14 米～∞，可根据被摄对象的特点随意选择。摄影镜头自 14 米至无限远的全程调焦时间为 1.7 秒。此镜头还具有预调焦记忆功能。摄影镜头还可绕支承基座进行 0°-95° 的旋转调节，以随意拍摄横幅画面或竖幅画面，并有锁紧钮。

二、反摄远型摄影镜头

由位于前方的负组透镜系统与位于后方的正组透镜系统所共同构成，且两组透镜系统的间距小于正组透镜系统焦距的摄影镜

头，称为反摄远型摄影镜头。显然，反摄远型镜头的光学结构正好与摄远型镜头相反——前者好似是将后者颠倒 180°而成。

反摄远型摄影镜头属于短焦距摄影镜头，视角较广，镜筒长度略长，其典型结构如图 2—2b 所示。由于起发散作用的负组透镜系统位于前方，所以使该光学系统的像方主平面向后移，甚至移至镜头后顶点的后方，从而使该镜头的焦距远远小于镜头的后工作距。

反摄远型镜头的最大特点是在缩短镜头焦距的同时，仍保证镜头具有相当大的后顶焦距，以便在曝光窗与摄影镜头之间留有足够空间，供安装与镜头光轴成 45°角的反光镜，并保证反光镜的正常工作。与普通广角镜头相比，反摄远型摄影镜头的像场边缘照度得到一定改善，最大相对孔径较大，并具有较好的成像能力。因此，目前单镜头反光照相机与反光取景式电影摄影机的短焦距摄影镜头，普遍采用反摄远型光学结构。反摄远型镜头最早系由法国昂热尼厄光学公司首先推出的。

反摄远型镜头也存在一些缺点，如前组透镜片直径较大，整个镜头长度和体积均比标准镜头明显增大。

此外，对称型光学结构的摄影镜头在拍摄距离改变时，镜头的成像性能一般变化不大；而反摄远型镜头因系非对称型结构，所以近距离拍摄时摄影镜头的成像性能往往有所降低（例如，有些反摄远型广角镜头在近距离拍摄时出现明显的场曲像差）。为此，一些新型反摄远镜头设计有近摄补偿机构，它可在近距离拍摄时改变镜头中调焦补偿光学组元相对其它透镜之间的距离，从而达到进一步校正场曲等像差，改善成像质量，提高影像清晰度的目的。譬如，欲拍摄较近距离处的景物而转动调焦环，使整个光学系统向前伸出的过程中，调焦补偿光学组元将产生附加旋转伸缩运动（也有的需单独调节），以改善镜头的成像性能。

图 3—16 所示为具有调焦补偿光学组元的反摄远型镜头的典

型光路。

图 5—14 所示为德国卡尔·蔡司光学公司生产的迪司它冈（DISTAGON）焦距 15 毫米、1:3.5 超广角反摄远型镜头的光学结构图。该镜头为 12 组 13 片式结构，对角线视角为 110°，调焦范围为 0.1 米至 ∞，有 UV、057、Y50、B11 四片内置滤光镜。第一片和第二片透镜均为凹透镜。

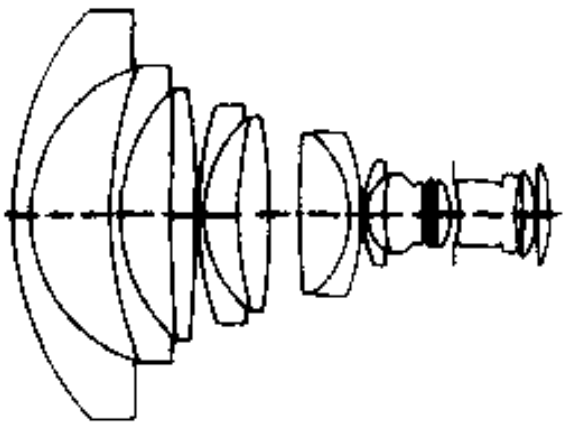
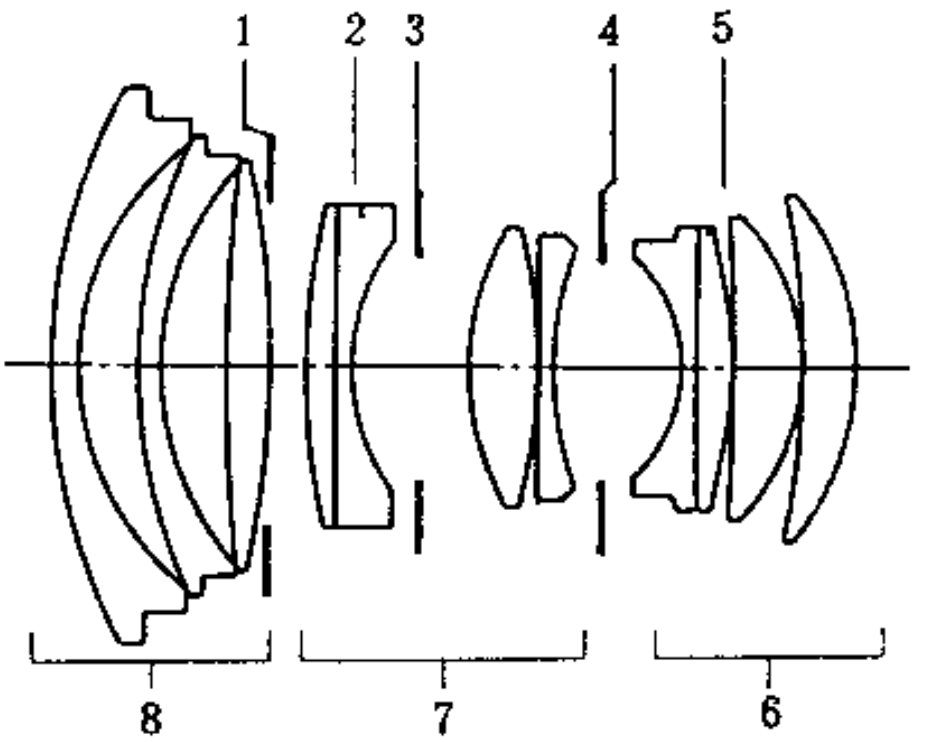


图 5—14 蔡司 15 毫米反摄远型镜头

图 5—15 所示为佳能 EF24mm F1.4L USM 型专业用摄影镜头。此摄影镜头为焦距 24 毫米的反摄远型超广角摄影镜头，采用 9 组 11 片光学结构。此摄影镜头全部透镜共分三大部分：前三组透镜为第 1 群，系固定系统，中间的第四、五、六组透镜为第 2 群，系调焦系统，光圈后方的第七、八、九组为调焦补偿光学组元，从而使此大口径摄影镜头在近距离处摄影时的场曲像差与球差，得到了良好的校正。此摄影镜头的第 5 片透镜为低色散的 UD 玻璃制造而成，以显著下降短焦距摄影镜头易产生的垂轴色差。第九片透镜的后表面采用了非球面技术，以明显降低此镜头的畸变与球差等像差，从面确保此款摄影镜头的高成像品质。此外，为了降低杂光，在第三片透镜后面设置了一矩形遮挡杂光光阑，并在第四组透镜后面设置了一个遮挡杂光光圈，有效提高了所摄影像的对比度。由于采用了上述先进光学技术，使得该摄影

镜头不但获得了 F1.4 的大相对孔径，而且成像质量有了显著提高——其成像质量明显高于该公司原来生产的 FD24mm F1.4L 型专业用摄影镜头（参见图 3—67 中所示），及 EF24mm F2.8 USM 型摄影镜头。



1. 矩形遮挡杂光光阑　2. UD 玻璃透镜　3. 遮挡杂光光圈
4. 光圈　5. 研磨加工的非球面透镜　6. 调焦第 2 透镜群
7. 调焦第 1 透镜群　8. 固定透镜群

图 5—15　EF24mm F1.4L USM 型超广角摄影镜头

第四节　普通超广角摄影镜头与鱼眼摄影镜头

一、普通超广角摄影镜头

普通超广角摄影镜头是供非单镜头反光取景照相机使用的短

焦距摄影镜头，其对角线视角一般大于90°。这类摄影镜头一般采用对称型光学结构，镜头的后顶焦距较短。常见有两种类型：一种是最前端与最后端的透镜均为正组透镜，另一种最前端与最后端的透镜均为负组透镜。

图5—16所示为德国卡尔·蔡司公司生产的托普冈（TOPOGON）超广角摄影镜头的光学结构图。托普冈镜头的前后两端均为正组透镜，中间两片皆为负组透镜。此镜头可以较好地校正球差和色差，因而在早期得到广泛应用，并以其为基础发展出了几十种改进型。

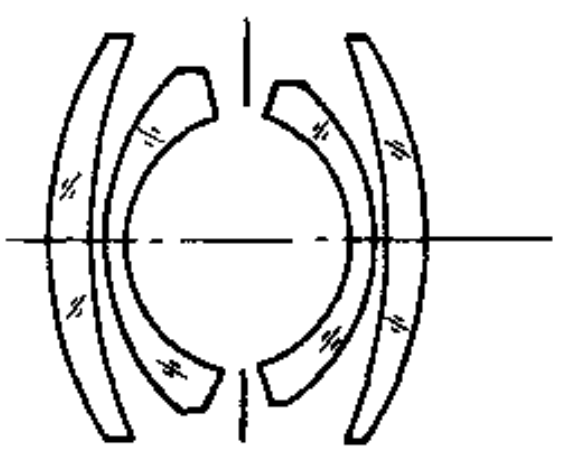


图5—16 托普冈超广角摄影镜头

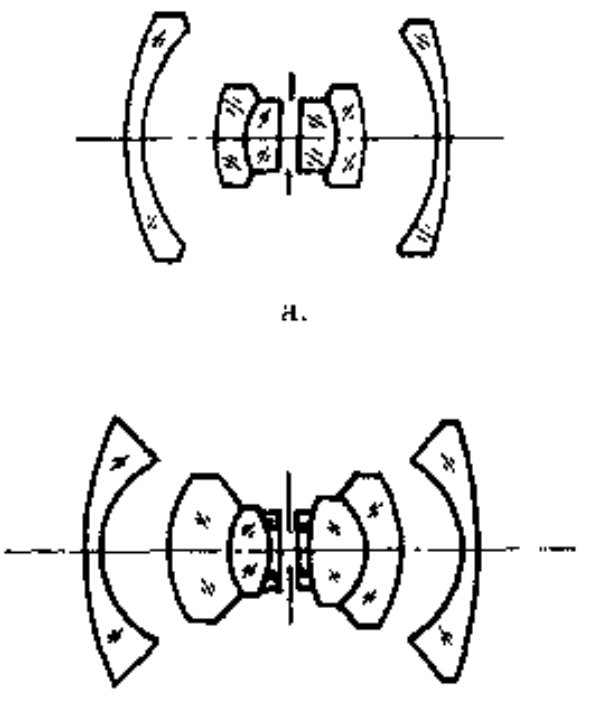


图5—17 超级昂格隆超广角摄影镜头

因普通超广角摄影镜头的视角很大，故由表3—15可知，其像场边缘的照度很低，这对摄影工作（尤其是对彩色摄影）很不利，因此近代普通超广角摄影镜头均在降低轴外像差的同时，极力补偿像场边缘照度，使之更趋近均匀分布。

为了改善像场边缘照度，减小边缘与中心像场照度的差值，

光学界普遍采用下述对称型结构：使光学系统前后两端均为向镜头中间显著弯曲（即向外凸起）的负组透镜，使镜头中间为正组透镜系统。其典型结构为图 5—17a 所示超级昂格隆（又称鲁萨）镜头。图 5—17b 所示为德国施耐德（SCHNEIDER）光学公司生产的超级昂格隆（Super Angulon）普通超广角镜头的光路图，其焦距为 75 毫米、最大相对孔径为 1:5.6，对角线视角为 92°（全开光圈），最大像场直径为 156 毫米（全开光圈），可供 4 英寸×5 英寸的大型专业照相机使用。由于最前面的第一组透镜采用了直径和发散能力均很大的负透镜，因而明显增大了轴外光束（即斜射光束）的入射孔径，使自视场边缘物点投射来的光束也能充满位于镜头中间的光阑面积（如图 5—18 所示），从而使照度分布的规律由 $\cos^4\omega$ 改进为 $\cos^3\omega$。不过此类结构的超广角镜头仍残存一定的光阑彗差，以至使该镜头像场的轴外分辨率略有所下降。

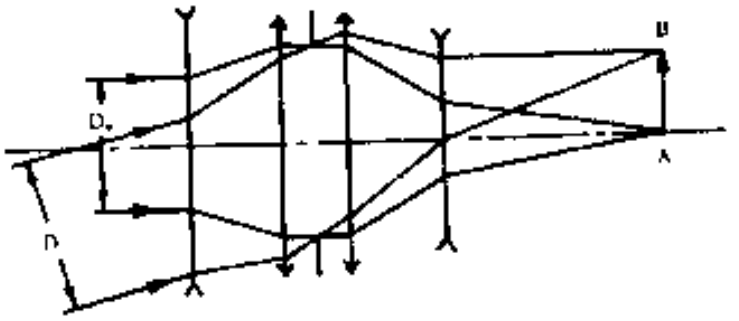


图 5—18　D′ > D

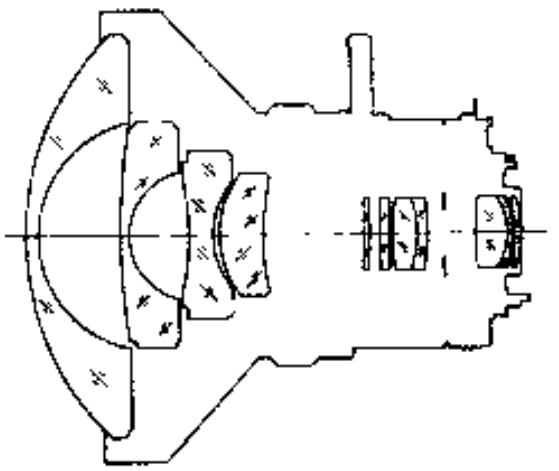


图 5—19　尼柯 8mm 鱼眼镜头

也有些新型超广角摄影镜头，采用了内置“中性密度径向渐变滤光镜”（中心密度大、外缘密度小）结构，以使该镜头的照度分布规律由 $\cos^4\omega$ 改进为 $\cos^2\omega$。例如，瑞士产仙娜（SINAR）照相机上配套的 SUHIIEDIDER 超级昂格隆超广角摄影镜头，就配备有使像场照度均匀性明显改善的中性密度径向渐变滤光镜，

使用时，镜头光圈应缩至 F16。

二、鱼眼摄影镜头

鱼眼摄影镜头前端的第一片透镜虽然向前明显高高凸起，但它并非是一凸透镜，而是一凹透镜，一般第二片透镜也为凹透镜，甚至第三片透镜还为凹透镜。正由于第一片透镜为直径很大的凹透镜，因而可使自很大视角处投射来的光线，能够折射到镜头内部，进而在像平面处结成清晰的影像。

图 5—19 为日本产尼柯（Nikkor）8 毫米，F2.8 鱼眼摄影镜头的光学结构图。该镜头采用 8 组 10 片式结构，视角 180°，影像为圆形的，直径为 23 毫米，调焦范围为 0.3m ~ ∞，光圈调节范围为 F2.8 ~ F22。由图中可知，该镜头第一、二、三组透镜均为凹透镜，并且第一片透镜的直径非常大，以至该镜头体积较大：直径为 123 毫米、全长 139 毫米。该镜头装有五片内置滤光镜。

图 5—20 所示为德国卡尔·蔡司公司生产的迪司它冈（F - Distagon）16 毫米、1:2.8 鱼眼摄影镜头的光学结构图。该镜头采用 7 组 8 片式结构，视角 180°，调焦范围为 0.3 米至 ∞，光圈调

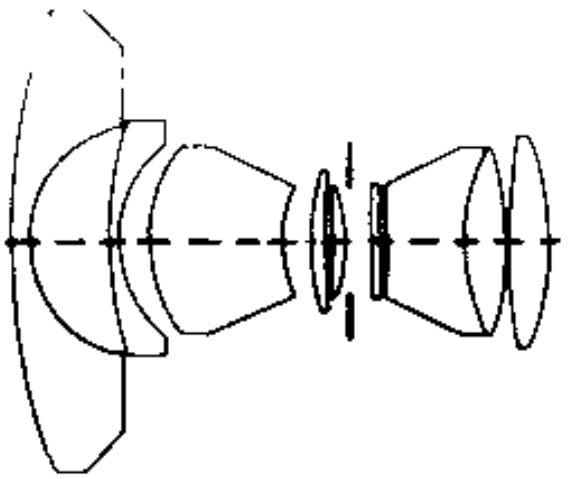


图 5—20　蔡司 16mm 鱼眼镜头

节范围为 F2.8～F22，有 UV、O57、Y50、B11 共四片内置滤光镜可供随意选用。该镜头第一片、第二片透镜均为凹透镜，并且第一片透镜的直径很大，因而该镜头体积较大，为 70mm × 61.5mm。

第五节　折反射型摄影镜头与变焦距摄影镜头

一、折反射型摄影镜头

成像光线在摄影镜头内不仅进行折射，而且需要进行反射的摄影镜头，称为折反射型摄影镜头（Catadioptric）。正因为此类摄影镜头与成像光线只进行折射的普通摄影镜头相比，增加了球面反光镜片，故一些光学公司又将折反射型摄影镜头简称为反光摄影镜头（Reflex，或仅标示字母 RF）。

折反射型摄影镜头属于长焦距摄影镜头，视角较窄，其外形参见图 5—21 中所示：第一片透镜的中央部分不透光（有如环形透镜），整个摄影镜头显得又短又粗，一般比同焦距的折射镜头具有较近的最近调焦距离。

折反射型摄影镜头的特点如下：在获得较长焦距的同时，使镜头的长度明显缩短，虽镜头直径略增粗，但整个外形显得比较小巧轻便，便于携带。由于引入了反光镜，故该镜头的色差校正得较好，以至于一些镜头的镜筒上没有红外线调焦基线。该摄影镜头价格较便宜。调焦环一般可转至超过无限远的标记，以使补偿因环境温度变化而引起的像面漂移。由于外形短粗，以至使焦距达 500 毫米的折反射型摄影镜头仍可用于手持摄影（快门时间应等于或小于 1/500 秒）。使用折反射型摄影镜头拍摄时，景物

中的光点和耀斑在画面中将呈现为小圆光环形，使影像别有情趣。

折反射型摄影镜头的最大相对孔径较小，一般为 1:8 ~ 1:11，因而取景时光线较暗，故对低照度下的取景、调焦和摄影略不利。此镜头所摄影像反差略低，像场照度略不匀，并且一般没有光圈叶片，因此拍摄时不能灵活控制景深，其通光量的改变需靠增减中性灰滤光镜来实现。有的折反射型摄影镜头上，有内置中性灰滤光镜以供灵活调节所成影像照度。也有的镜头上，备有后置中性灰滤光镜，摄影时可将所需滤光镜临时拧在镜头后端。例如，美能达 RF500、F8 折反射型摄影镜头即备有 ND4×、ND8×、NORMAL、Y52、O56、R60、A12、B12 八片滤光镜，及装卸这些滤光镜的专用扳手（参见图 3—83）。

图 5—21 所示为一种典型的三组五片式折反射型摄影镜头。该镜头中透镜 1 的后表面中央部位镀有圆形反光层，透镜 2 在中央部位开有圆孔。上述圆形反光层和圆孔的直径相同，透镜 1 与透镜 2 胶合成一整体。反光镜 3 为表面镀有反光层的圆环形球面反光镜。透镜 4 与 5 胶合成一组。自景物投射来的光线，经透镜 1、2 的折射后，投射到反光镜 3 的凹形反光表面上，然后被反射到透镜 1 背面的球面反光镜上，再经过反射后，穿过透镜 3 中

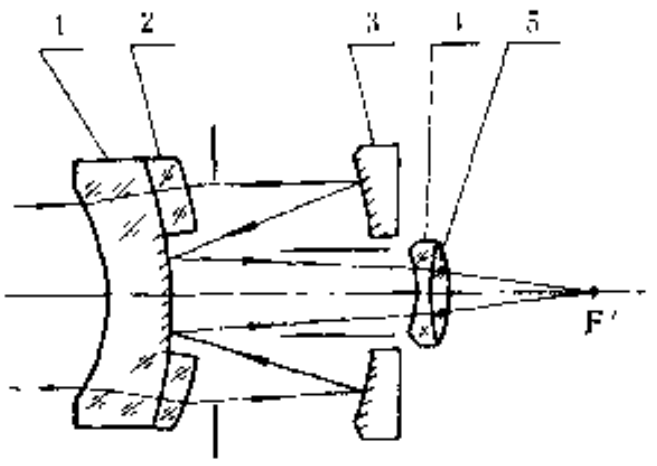


图 5—21 三组五片式折反射型镜头

央的孔，到达透镜 4 处，最后经透镜 4、5 的折射，在像平面上结成清晰的影像。

图 5—22 所示为日本产腾龙（TAMRON）SP、500 毫米、1:8 折反射型摄影镜头，图 a 为外形图、图 b 为光路图。由图可知，此镜头采用四组七片式结构。其反光面不在透镜的外表面，而在透镜的内表面处。此镜头视角为 5°，调焦范围为 1.7 米至 ∞，有 MACRO 功能，可获得 1:3 的影像放大率，备有后置滤光镜。镜头直径为 84 毫米，长 91.5 毫米、重 535 克。

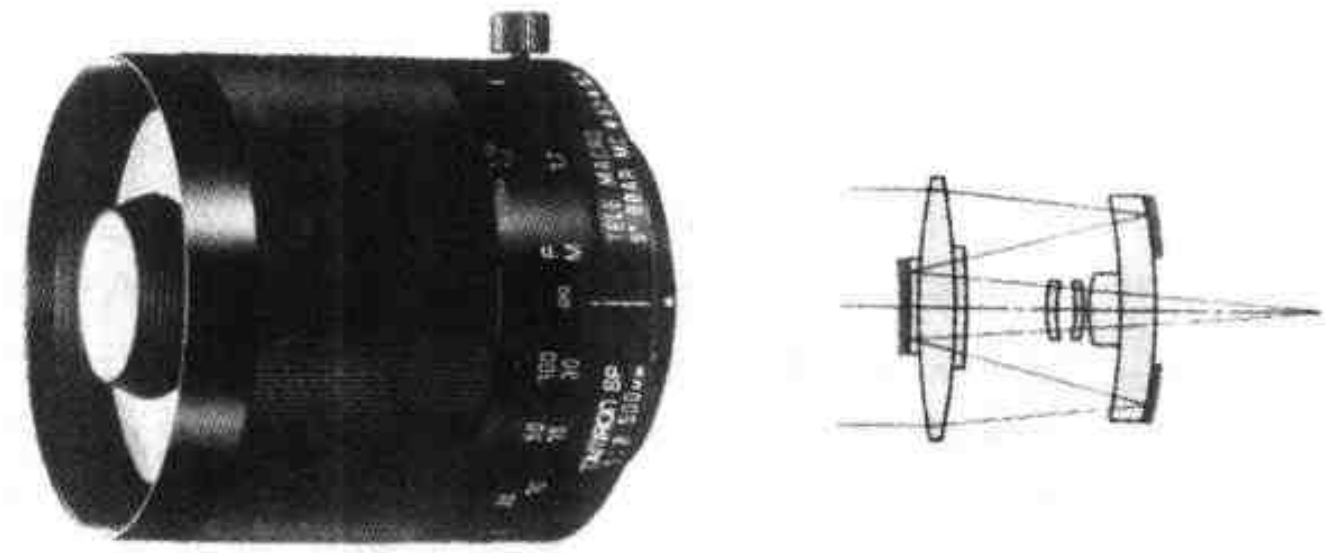


图 5—22　腾龙 SP500 毫米、1:8 镜头

二、变焦距摄影镜头

变焦距摄影镜头的光学结构形式繁多，各自性能也差异很大。典型变焦距摄影镜头的光学系统一般由以下四部分组成：调焦群、变倍群、补偿群、固定群。

调焦群一般位于变焦距摄影镜头的前部，并与调焦环联动，起调焦作用。

变倍群一般位于变焦距摄影镜头的中部，并与变焦环联动。调节变倍群可以改变整个摄影镜头焦距的大小。

补偿群一般也位于变焦距摄影镜头中部，并与变倍群联动调节。当变倍群使摄影镜头的焦距改变时，补偿群可使成像平面的前后位置保持稳定不变。

固定群（又称中继组）一般位于变焦距摄影镜头的后部，起主要成像作用，以及校正前面各组透镜残存像差的作用。也有的变焦距摄影镜头除有后固定组外，在镜头调焦组的前方还有一前固定组。

目前，变焦距摄影镜头正向进一步改善成像质量、大相对孔径、大变倍率、小型化、较短的最近调焦距离、有微距装置、短焦距等方向发展。

图 0—11 中所示为英国兰克·泰勒·哈勃森公司（RANK TAYLOR HOBSON）生产的柯克（COOKE）5 倍变焦距 35 毫米电影摄影镜头的光学结构图。此镜头焦距为 20 ~ 100 毫米，光圈调节范围为 F2.8 ~ F22（T3.1 ~ T22），调焦距离为 0.7 米 ~ ∞，对角线视角为 70 ~ 16，水平视角为 58° ~ 12°，最大像场直径为 27.2 毫米，后顶焦距为 54.3 毫米，镜头总长（自像平面开始）370 毫米，最大直径（前端）为 145 毫米，重 4 公斤。在最大焦距和最近调焦距离处能被拍摄下的物体宽度为 89 毫米。柯克 5 倍变焦距镜头采用 14 组 21 片式的光学结构。图 0—7 所示为在 20 毫米焦距，且对无限远调焦时的光路图，图中 1 为调焦群，2 为变倍群、3 为补偿群。

我国北京 608 厂曾于 1976 年仿制过柯克 5 倍变焦距摄影镜头，其基本性能大致相同，但最近调焦距离略远（为 0.9 米），后顶焦距略大（为 57.64 毫米），镜头总长（到像面）略短（为 355.96 毫米），重量重了一公斤（为 5.5 公斤）。

图 5—23 中所示为法国昂热尼厄公司（Angénieux）生产的昂热尼厄 10 × 25 T2 型 10 倍 35 毫米电影变焦距摄影镜头的光学结构图。此镜头焦距为 25 ~ 250 毫米，最大相对孔径为 1 : 3.2

(T3.9)，最近调焦距离为 1.7 米，由 11 组 14 片透镜组成。

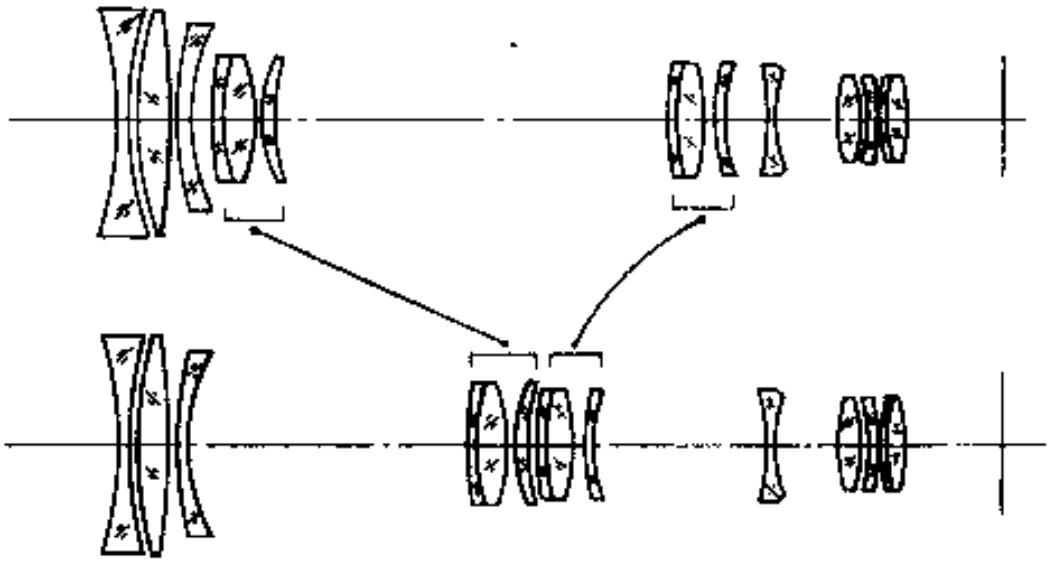


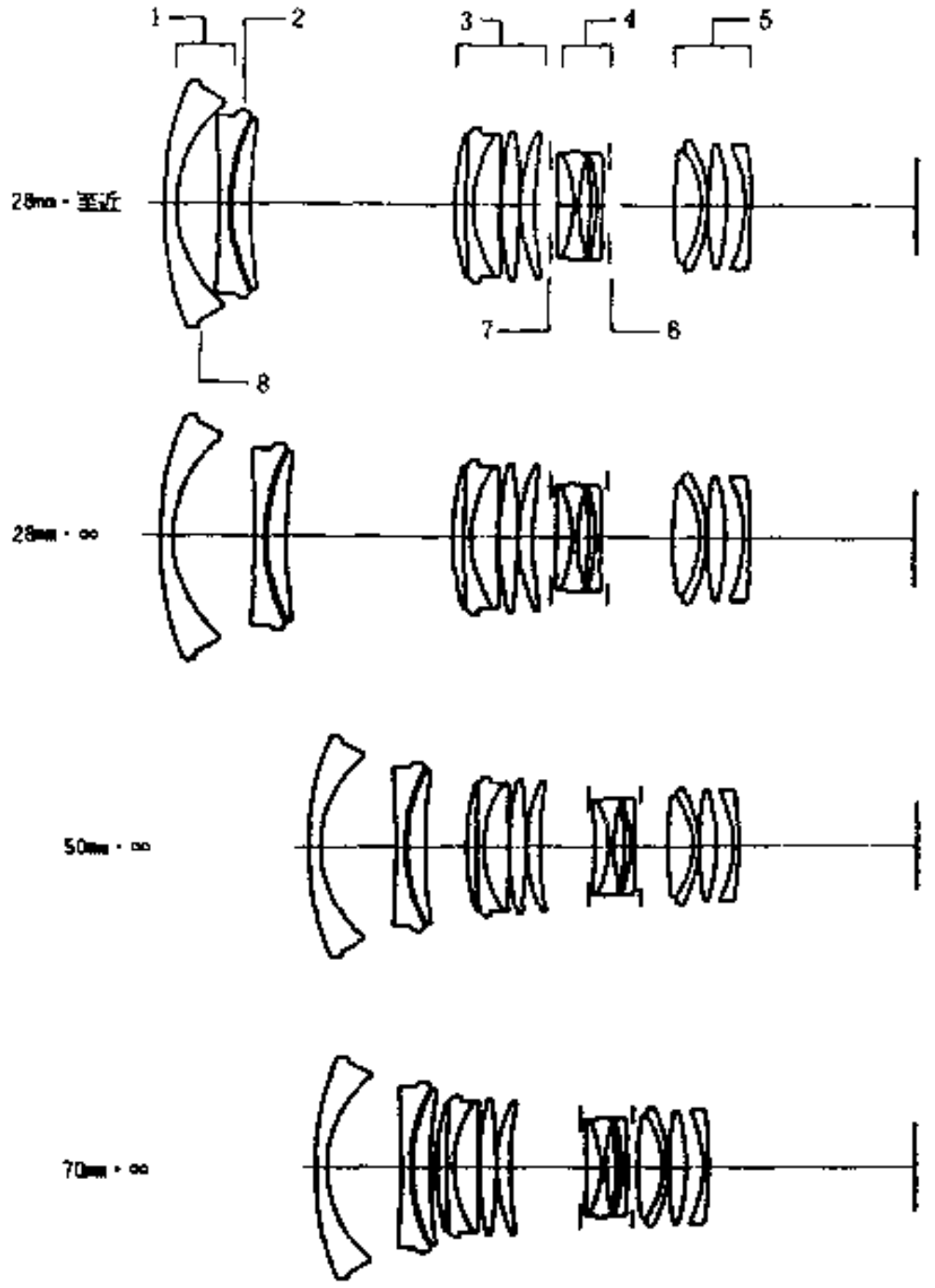
图 5—23　35 毫米电影用变焦距摄影镜头

图 5—24 中所示为佳能 EF28—70mm F2.8L USM 型变焦距摄影镜头的光学结构图，该摄影镜头为供 35mm 照相机使用的自动调焦式变焦距摄影镜头（AF）。此摄影镜头的焦距范围为 28-70 毫米，最大相对孔径为 1:2.8，最小光圈为 F22，光圈由 9 片叶片组成，最近调焦距离为 0.5 米，滤光镜尺寸为 77 毫米，镜头的最大直径为 83.2 毫米，长度为 117.6 毫米，重量为 880 克。图中自上至下 4 图分别为调焦至最近距离处且变焦至 28 毫米焦距处、调焦至无限远且依次变焦至 28、50、80 毫米处时的光学结构图。

此摄影镜头采用 10 组 16 片式结构。为了实现在全部变焦过程中保持光圈的恒定不变，该摄影镜头除主光圈外还设计有一副光圈，此副光圈可随摄影镜头焦距的改变而自动进行相应变化，以控制入射光瞳直径进行同倍相应补偿。镜头第 1 片透镜采用大直径、高精度研磨成型的非球面透镜，明显降低了畸变与球差，并改进了像场边缘的照度，使之更趋均匀。

此摄影镜头全部透镜共分五群，第二群透镜为调焦系统，其余四群（即第 1、3、4、5 群）为变焦系统。由四群透镜共同控

制变焦，以确保该镜头在全部变焦范围之内具有较一致的优良成像质量。



1. 第一群　2. 第二群　3. 第三群　4. 第四群　5. 第五群
6. 副光圈　7. 光圈　8. 非球面透镜

图 5—24　佳能 EF28-70mmF2.8L 型变焦距摄影镜头

此款摄影镜头采用内调焦技术，摄影镜头第 2 组透镜组为调焦组元。当摄影镜头对无限远调焦时第 1 与第 2 透镜组之间的间

距最大，当摄影镜头自无限远状态针对近距离景物调焦时，第2透镜组开始向前产生单独位移，逐渐缩短与第1透镜组之间的间距，全范围调焦时间为0.42秒。镜头采用超声波马达进行驱动，调焦迅速、安静，并可进行手控调焦。调焦时镜头前镜圈始终保持不旋转并与变焦镜头同步伸缩，配合上专用花瓣型遮光罩(EW-83B)，可以更有效地遮挡杂光，并便于偏振镜与专用方型滤光镜插座的使用。

图5—25所示为日本潘太克斯（Pentax）A28～135毫米、F4变焦距摄影镜头的光学结构图。上图为变焦至28毫米时的位置关系，下图为变焦至135毫米时的位置关系。此镜头采用15组17片式光学结构。由图中可知，此变焦距镜头没有固定组，整个光学系统分为四部分，变焦时由凸轮控制各部分做复杂的曲线运动，亦即固定组的作用由上述四部分共同承担。

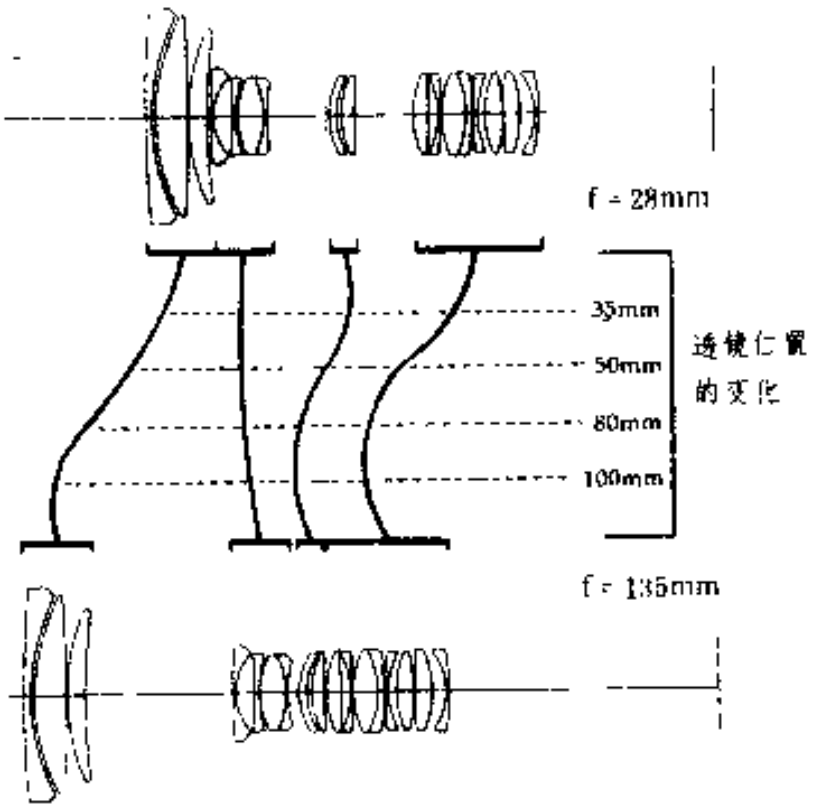
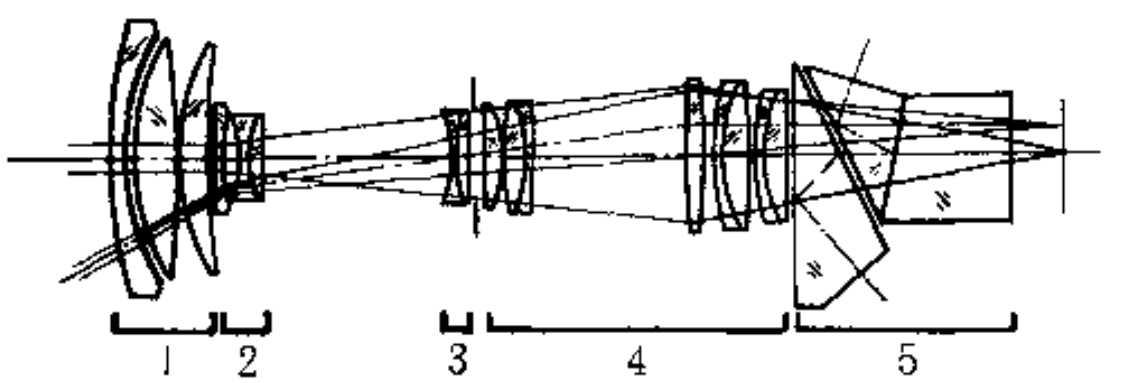
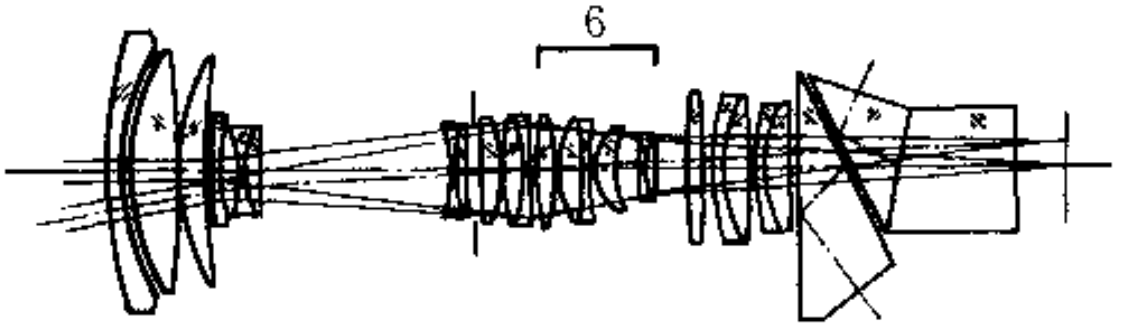


图5—25　潘太克斯A28～135毫米变焦距镜头

此外，某些近代电视用变焦距摄影镜头内部，还有内置增倍

群（内置倍率群），拨动镜筒外侧的相应手柄，可使该内置增倍群插入或移出摄影光路，从而达到成倍增大整个变焦距摄影镜头变焦范围之目的。例如日本佳能 J18×8.5B IRS 型 2/3 英寸电视摄影镜头，其正常变焦范围为 8.5～153mm，当拨动手柄使 2× 内置增倍群插入到摄影光路内的中继群之间时，该摄影镜头的实际变焦范围变为 17～306mm，参见 5 图—26 所示（其中 a. 图为正常摄影状态，b. 图为插入内置增倍群状态）。





1. 调焦群　2. 变倍群　3. 补偿群　4. 后固定群

5. 蓝、红、绿分光棱镜　6. 内置增倍群

图 5—26　佳能电视摄像镜头中的内置增倍群

思　考　题

1. 何谓摄远型镜头、反摄远型镜头、折反射式镜头？
2. 常见摄影镜头的光学结构与特点？
3. 三片式柯克、天塞、双高斯摄影镜头的各自特点如何？

第六章　摄影镜头的选购与维护

第一节　摄影镜头的选购

一、选购原则

欲摄影，就必须有摄影镜头，而高质量照片的拍摄，又与摄影镜头的正确选择紧密相关。

目前，世界上生产摄影镜头的厂家很多，既有专业光学公司，又有照相机、电影摄影机工厂，因而摄影镜头的牌子和商标繁多，至于规格、型号就更庞杂了。面对这众多的产品，往往使摄影者无所适从。

纵观这五彩缤纷的摄影镜头产品，不外乎以下三种分类方式：按价格分，有高档、准高档、中档、普及档、低档之别；按焦距分，有定焦、变焦及长焦、标准、短焦之异；按用途分，又有普通与特殊之差。

高档摄影镜头的性能优异，但价格昂贵。例如，德国产卡尔·蔡司镜头、罗敦司特镜头、施耐德镜头、莱兹镜头、罗莱弗莱克斯镜头，英国产柯克镜头。

准高档摄影镜头的性能良好，价格较高。例如，日本产尼柯镜头、潘太克斯镜头、佳能镜头、法国产昂热尼厄（俗译为安琴）镜头。

中档摄影镜头的性能较好，价格适中。例如，日本产美能达镜头、奥林巴斯镜头、玛米亚镜头、腾龙镜头、适马镜头、图丽镜头。国产凤凰牌、海鸥牌摄影镜头在品质上属于中档摄影镜头，但其售价却远较诸进口品牌摄影镜头要便宜得多。

普及档摄影镜头的性能一般，价格略低。例如，日本产雅西卡镜头、柯尼卡镜头、富士卡镜头、理光镜头、勃朗尼卡镜头，美国产威达镜头。

低档摄影镜头虽性能较低，但价格便宜。例如，百老汇镜头、金鹿镜头等杂牌摄影镜头。

上述高、低档分类仅以各厂所生产之最高级摄影镜头相对比而言。

其实各厂家为了适应社会上不同购买力及适应不同顾客的需要，一般同时生产不同档次的摄影镜头，以使使顾客有更充分的选择余地，从而达到吸引更多顾客，扩大产品总销售额的目的。例如，佳能公司生产的 FD35～70mm、F3.5～4.5 变焦距摄影镜头即属于低档摄影镜头，该镜头成像质量很差，而且镜筒等机械部件大部分是用塑料注塑制成，重量很轻、成本很低，故售价也很便宜。

光学公司所生产之全部摄影镜头若按焦距分类，其规格、型号很多。有的摄影者在购置摄影镜头时，总希望能购置一套很“全”的摄影镜头，这种观点其实并不妥。譬如，美能达的 50 毫米标准摄影镜头，共有 F1.2、F1.4、F1.7、F2 四种规格，其价格依次降低，这是为不同购买力的顾客分别设计生产的，摄影者只需从中选购一只即可，完全没有必要为了求“全”而每种均买一只。

又如，德国卡尔·蔡司公司为瑞典哈苏 2000FC/M 型 120 照相机生产的配套摄影镜头的规格很多，其中焦距 100mm、F3.5，105mm、F4.3，120mm、F4，135mm、F5.6，150mm、F4 五种规格，也大可不必每只均购买。因为其中 105mm 镜头是专供紫外

线摄影使用的，若不进行紫外线摄影，根本不必购买；135mm 镜头是专供安装在专用伸缩皮腔上进行近摄用的镜头，若未购置伸缩皮腔，则该镜头将无法直接安装在机身上，从而无法使用；100mm 镜头的焦距又与 80mm 标准镜头过于接近，所摄画面效果也很相似，故一般也没必要购买。剩下的只有 120mm 和 150mm 两只镜头，若摄影者经常拍摄人物，则建议购买焦距 150mm 的镜头；若摄影者经常近摄，则建议购买专门对近摄进行了像差校正的 120mm 焦距镜头。

再如，卡尔·蔡司公司为阿莱弗莱克斯 35mm 电影摄影机生产的配套摄影镜头有：16mm、F2，18mm、F1.2，20mm、F2，24mm、F2，25mm、F1.2，28mm、F2，32mm、F2，35mm、F1.2，40mm、F2，50mm、F1.2，50mm、F2，60mm、F2.8，85mm、F1.2，85mm、F2……。显然，在购置了最大相对孔径为 F1.2 的 18mm、25mm、35mm、50mm、85mm 焦距的摄影镜头后，一般就没有必要再购买最大相对孔径为 F2 的 20mm、24mm、32mm、50mm、85mm 焦距的摄影镜头了。

由于大多数摄影者的经济条件、摄影目的、兴趣爱好等不同，因而很难提出一套对每个人均适宜的选购镜头方案，但下述选购原则值得考虑：

对于从事专业摄影的工作者，适宜购买高档、准高档或者中档摄影镜头；欲从事业余摄影创作，则适宜买中档或普及档摄影镜头；若仅为了拍摄普通纪念照，则可购买普及档、低档（或中档）摄影镜头。至于具体购买哪一档次的摄影镜头，可视具体经济条件、以及本人兴趣的浓淡酌情而定。

从事专业摄影工作或业余摄影创作的同志，不仿多选购一些不同焦距规格的摄影镜头，以便在拍摄中能根据创作意图和拍摄环境，加以灵活选择；只欲拍摄纪念照的同志，购买一、两只摄影镜头就可以了。至于选购多少只，也应视本人的经济条件和兴

趣爱好及追求而定。

选购摄影镜头时还应考虑从事摄影时的使用机率。例如，8毫米鱼眼镜头虽有其独特的画面效果，但用途确实有限，使用机率很低，故对一般专业摄影者来讲，花那么多钱买一只这种镜头是不值得的。何况我国经济水平尚属发展中国家，而且这种昂贵的8毫米鱼眼镜头，在光学公司内部也是根据定货的具体数量而专门生产的。又如，焦距500毫米和1000毫米摄影镜头虽各具特色，但使用机率也较低，与其两者均购买，倒不如只买一只500毫米的摄影镜头，再配置一只2×倍率镜更为经济实用。

此外，在选购摄影镜头时应密切注意镜筒与滤光镜的配合尺寸。最好能选择滤光镜口经统一的摄影镜头，以减少配置滤光镜的数量，既便于携带和更换，又减少开支。若做不到口径统一，也应力求减少镜筒前端联接螺纹尺寸的种类。万勿仅买了三只镜头，而三只的尺寸还各不相同，以至需配置三套滤光镜。

选购专业公司生产的摄影镜头时，还应在订货单上明确注明与该镜头联接之机身的镜头座规格，若不知道该规格代号，可详细注明系供哪一种牌子、哪一种型号照相机或摄影机使用的。以免到货后因镜筒与机身的联接规格不一致，而无法立即投入使用。国内一些单位因不熟悉这一问题，曾在订货中出现过下述教训：某厂自法国昂热尼厄光学公司，订购一批供德国产阿莱弗莱克斯ⅡA35毫米电影摄影机使用的2×倍率镜，因未注明镜头座规格，昂热尼厄公司按法国卡米弗莱克斯35毫米摄影机镜头座规格，制成了倍率镜，到货后我方无法使用，又无法索赔，只好逐个重新改装；某单位欲为已有的阿莱弗莱克斯ⅡC 35毫米电影摄影机订购二套大相对孔径的摄影镜头，因误注成PL型镜头座，到货后始发现均是供阿莱弗莱克斯35BLⅢ型摄影机使用的摄影镜头，根本无法装至ⅡC型摄影机（后者要求为钢质卡口座）上，以至将其多年束之高阁；也有人因不了解情况，托人自

国外购置了同一相机厂家的镜头，因规格不符，虽能装到照相机上进行普通摄影，但照相机原本具有的快门优先式自动曝光和程序式自动曝光功能却丧失了。

二、最佳选购方案

所谓“最佳”选购方案均系以摄影者的经济条件、工作性质、艺术追求及兴趣爱好等为依据的。下面试就135单镜头反光照相机例举几种选购摄影镜头的方案，以供参考。

1. 如果您仅仅是为了拍摄些生活纪念照片，并不准备搞业余摄影艺术创作，也不想在摄影上花费更多的精力和物力，则可以只买一只标准摄影镜头。

2. 如果您除想拍摄些生活纪念照片外，还想搞点业余艺术摄影创作、陶冶情操，而本人经济又不宽裕，则可考虑下述两方案：若欲经常进行抓拍摄影，以猎取生活中的美好瞬间，则可购买一只焦距为35～135毫米（或35～105、28～105、28～135毫米）的变焦距镜头；若欲进行精雕细刻式的摄影，以求获得最高质量的画面，则可购买焦距为28（或24）、50、135（或105）毫米的三只定焦距摄影镜头。

3. 如果您准备从事业余摄影艺术创作，经济条件又一般，建议您在购置上述2. 中的摄影镜头外，再配备一只2×倍率镜。

4. 如果您从事专业摄影工作，又有一定预算，或您准备从事业余摄影艺术创作，又有一定的经济能力，则建议您在下述方案中选择：若需经常进行抓拍摄影，则可购买焦距分别为28～85（或28～50）毫米和70～210（或80～200）毫米的二只变焦距镜头及一只2×倍率镜；若欲获得高质量的画面，则可购买焦距分别为28（或24）50、135（或105）、200（或300）毫米的定焦距镜头，及一只2×倍率镜；若对上述两种需要兼而有之，则可

购买焦距为 28（或 24）、200（或 300）毫米的二只定焦距镜头、一只焦距为 35～135（或 35～105、28～105、28～135）毫米的变焦距镜头，及一只 2× 倍率镜。

5. 如果您从事专业摄影工作，预算又比较充足，或您准备从事业余摄影艺术创作，经济又很富裕，则可同时购买一套变焦距镜头和一套定焦距镜头，以备不同需要（参照上述 4. 中所列镜头规格）。

6. 如果您从事专业或业余摄影，经济条件又允许，可不妨在上述 5 的基础上，增购一只焦距 20（或 21）毫米的超广角镜头及一只 500（或 600）毫米的超摄远镜头及 2× 倍率镜（长焦用）。若经常进行体育摄影，则可购买一只焦距为 85～300 毫米、甚至 100～500 毫米的变焦距镜头。若需经常近摄昆虫、花卉植物，则可购买一只焦距为 105（或 100、200）毫米的 MACRO 镜头，若需经常翻拍近摄，则可购买一只焦距为 50（或 55）毫米的 MACRO 镜头。若经常需拍摄一些建筑照片，则可购买一只具有透视调整功能的广角镜头。

此外，选择变焦距摄影镜头时还应注意以下几点：摄影镜头的变倍率不宜选得太大，照相用变焦距镜头的变倍率一般选不大于 3× ～4× 者为宜；不必追求购买最大相对孔径很大的变焦距摄影镜头，因其光圈开至最大时的成像质量常常明显变差；某些新式超小型变焦距摄影镜头虽长度较短、体积较小、重量较轻、便于操作和携带，但上述优点多数是以牺牲一些成像质量为代价的，故选择时应慎重；由于变焦距镜头中透镜片与空气相接触表面的数量较多，故多层镀膜对变焦距镜头尤为重要。

摄影用滤光镜的选购原则也大同小异，下面试例举几种选购滤光镜的方案，以供参与。

1. 经济条件较困难，也不准备进行业余摄影艺术创作者，若经常拍摄黑白照片则可买一只 UV 滤光镜安装在摄影镜头前

端，以保护镜头；如若经常拍摄彩色照片，则建议买一只天光镜，以保护镜头。

2. 经济条件稍好，若欲进行黑白摄影创作，则建议买 UV、黄绿（YG 或 POO、XO）、中橙（雷登 21）、中红（雷登 25）四种滤光镜。若进行彩色摄影创作，则建议购买天光镜、雷登 81D（或 81C）、82C 三种滤光镜。

3. 经济条件好，又欲进行摄影艺术创作，除购买 2. 中滤光镜外，建议再购买偏振镜（所用照相机为传统相机时可购买较便宜的线偏振镜 PL，若使用现代自动调焦单镜头反光照相机，则应购买圆偏振镜 C-PL）及中性密度滤光镜 ND8 二种滤光镜。

4. 有足够预算的专业摄影工作者，除需购买上述 2、3 中所列滤光镜外，还可购买中黄（雷登 8）、深黄（雷登 15）、深红（雷登 29）、中蓝（雷登 47）、中绿（雷登 58）五种黑白摄影滤光镜，雷登 81、81A、81B、81C（或 81D）、81EF 和雷登 82、82A、82B 及雷登 80D、80C、85C 十一种彩色摄影滤光镜，以及 ND2、ND4 二种中性密度滤光镜。

电影摄影工作者必须购买雷登 85B、85 二种彩色片转换滤光镜，以备用灯光型彩色胶片拍摄外景时使用。

5. 有充裕预算的专业摄影工作者，除需购买上述 2、3、4 项中所列滤光镜外，尚可购买一些常用效果镜，例如：渐变滤光镜、柔光镜、雾镜、反差滤光镜、星光镜、衍射镜、彩色偏振镜、多像镜等，并可购买黄、品红、青三套彩色补偿滤光镜（CC 镜）。若经常使用日光片在灯光下拍摄，则应购买雷登 80A、80B 彩色片转换滤光镜。

第二节　摄影镜头的挑选与检验

选购摄影镜头时对镜头进行全面的检验，可以验证、判断该

镜头质量的高低和性能的优劣，从而有助于挑选到称心如意的镜头。使用摄影镜头前对其进行仔细检验，有助于及时发现故障及隐患，确保摄影的顺利进行。此外，借用、租用摄影镜头前的检验可明确摄影镜头损坏的责任在哪一方。

挑选摄影镜头的常见检验方法，主要有外观检验、操作性能的检验、简易成像性能检验、拍摄检验、仪器检验五种。

一、外观检验

摄影镜头的机械系统主要包括：镜筒、镜片压圈、螺钉、光圈叶片、光圈调节环、调焦环、变焦环及相应调节机构。有的还有镜间快门及其调节机构，快门调节环和快门叶片。

摄影镜头的光学系统主要包括：各透镜片、反光镜、内置滤光片。

摄影镜头的外观检验主要包括，对摄影镜头机械系统的外观检验与对光学系统的外观检验两部分。

对摄影镜头机械系统应进行下述外观检验。

1. 机械系统的外表面应光滑，无裂纹、无磕碰伤痕、无划伤、无磨损、无锈痕、无霉斑；电镀表面的镀层应光亮美观，无泛黄、无锈蚀、无剥落现象；装饰单应平整美观、牢固，无开胶、无翘起。镜筒表面涂层应平滑、无脱落，无明显的颜色不匀。

2. 反复收小、开大光圈，检查光圈叶片前后表面上是否有油污、有锈痕。油污多系装配镜头时加油过多而溢流至叶片上的，这既易使光圈叶片被油粘住而不灵活、甚至粘死，又易流到透镜片上影响成像光线通过，下降所摄影像清晰度。对于全开光圈测光式单镜头反光照相机的摄影镜头，可先将光圈调节环调至最小光圈挡（即大 F/数处），再用手拨动镜头后端的自缩光圈

杆，使光圈收小和开大以供检验。

3. 机械系统的内表面（指镜头内部）应乌黑、无光泽，漆层应无脱落漆片的现象。

4. 螺纹表面及螺钉、镜片压圈等的槽口应完好，无损伤、无拆卸痕迹。

5. 镜筒及各调节环上的标尺线、数字、字母等最好为刻制而成（即各标尺线等均为凹进去的），且清晰美观。若各标尺线、数字、字母等为印刷在镜筒和调节环上的（即各标尺线等为平的、未凹进去），则说明加工工艺较低，这类标尺线、数字、字母等经一定时间的使用后，将会模糊不清。

对摄影镜头光学系统应进行下述外观检验（检验前应将摄影镜头自机身上卸下；若摄影镜头上有镜间快门，则还应打开 B 门；若镜头不可自机身上卸下，则需打开机身后盖和 B 门）：

1. 透射光检验

将镜头光圈开至最大（若卸下镜头后光圈已缩小，则应用手拨动镜头后端的自缩光圈杆，使光圈全开），让明亮、倾斜的光线先后自镜头前端或后端逆射入摄影镜头，并从另一端透过镜头观察其内部光学元件，各镜片均应完整、清洁，并应做到：

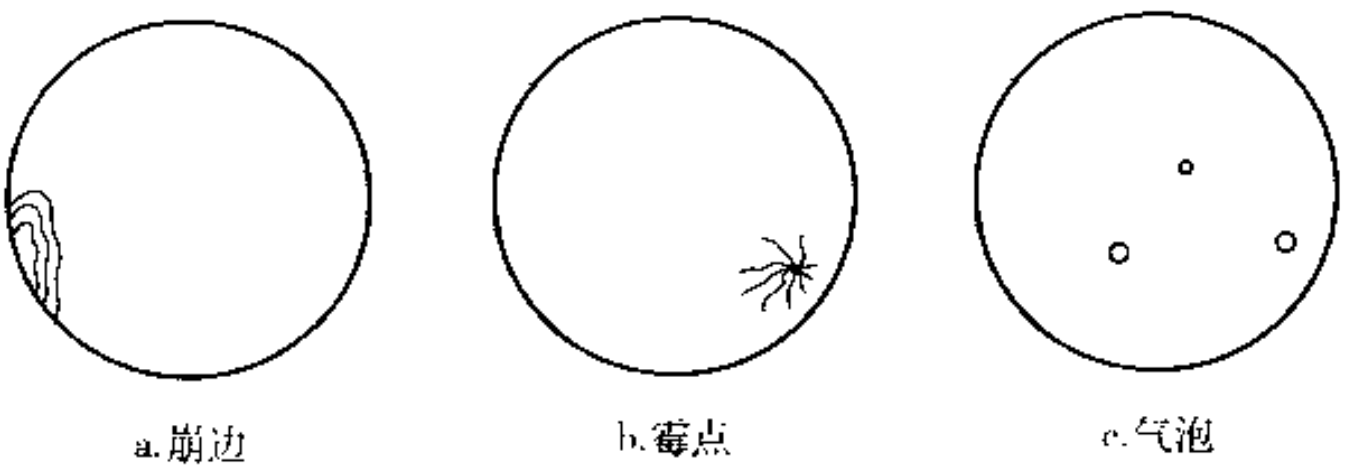


图 6—1　镜片缺陷

无裂纹。裂纹多系摄影镜头受到摔跌、碰撞等剧烈震动而引

起的。

无崩边。崩边指透镜片边缘有破碎之处，如图 6—1a 所示。崩边多系因摔跌、碰撞或装配不当而引起的。

无开胶。开胶指胶合透镜之胶合面的胶膜与镜片裂开，该开胶部位将变得呈半透明的银白色状。开胶多系因受到碰撞或剧烈震动、温度骤变而引起的。

无发霉。发霉指透镜的胶合表面或空气表面上，出现形状如不规则的放射状或枯树枝状的霉斑。如图 6—1b 所示。发霉多系因存放环境潮湿、闷热、不通风，从而在透镜表面滋生了霉菌，以至浸蚀了镜片表面的镀膜层，甚至浸蚀了玻璃本身所引起的。

无大气泡。尤其是各镜片的中心部位不应有明显的大气泡。气泡形状如图 6—1c 所示。气泡系光学玻璃本身的质量缺陷。

无划伤。划伤多系清洁镜片的方法不当而造成的。

无油污。油污多系装配时往机械摩擦部位加油过量、以至溢流至镜片表面上。

无指纹。指纹系用手指直接触摸镜片后沾上的手指印痕。

无杂物。杂物指附着在镜片表面上棉花绒毛、漆片碎屑、灰尘，以及残留在镜头内部的金属碎屑等物。杂物系由于装配车间不清洁，质量管理混乱，装配工艺低劣造成的。

无水气、无雾气。

检验变焦距镜头和内调焦式镜头时，应将镜头依次变焦至不同焦距处及调焦至不同距离处进行仔细检验。因为透光检验时，有时会出现下述现象：在某一焦距处或某一调焦距离处不易发现的缺陷，一旦调至另一焦距或另一调焦距离处时，会逐渐明显暴露出来。

2. 反射光检验

先后将摄影镜头前端和后端略微偏向明亮的地方，并从该镜头的侧方，观察镜片表面的反射光线，以检查镜片反光部位的镀

膜层有无划伤的微痕，及有无脱膜、干涉色明显不均匀的现象。

进行上述透射光检验和反射光检验时，应反复仔细进行，并应边观察边上下左右移动和摆动被测镜头，以便检验镜头的每一部位。

3. 用手轻轻摇动摄影镜头，应无异样响声。若有“咔啦、咔啦”的响声，一般多系因镜片压圈松动而引起镜片松动所发出的碰撞声。此时镜头中各镜片将不再共轴，从而导致像差显著增大，镜头成像质量（如影像清晰度）明显下降。

二、操作性能的检验

1. 在调节摄影镜头镜筒外表面上的调焦环、变焦环等时，手感阻力的大小应适中，且应始终均匀一致、平滑，既无死点、涩点，又不过分灵活，更无松动、晃动，反向调节时应无空回手感。光圈调节环和镜间快门调节环内的各挡定位装置，应换挡明显、定位准确、可靠，既不过紧，又无松动。各调节环应不会自行移位（例如，推拉式变焦距镜头和微距摄影镜头在俯、仰拍摄时，其变焦环和微距调节环应不至于因镜片与移动镜筒的重力，而出现自行位移的现象）。

2. 光圈叶片所形成的光孔应呈有规则的多边形或圆形，无脱落的光圈叶片，此外光圈叶片上应无锈痕、无油污。各挡光圈数下的光孔形状应有明显区别（尤其应注意最小两挡光圈之间有无明显区别，如 F22 与 F16 或 F16 与 F11 之间应有明显区别）。自动收缩光圈杆所控制的光圈收缩和张开应灵活自如，把光圈调节环调至 F16（或 F22）后，用手反复轻拨镜头后端的自动收缩光圈杆，光圈每次收缩后的光孔形状和大小应相同。拨动镜头上的“预看景深杆”时，镜头光圈的缩、张应灵活自如、光孔大小应准确。

3. 摄影镜头与机身的联接应可靠，锁紧装置应能锁牢（不

应出现因配合尺寸不对而装卸过紧、过松及装不上、锁不牢的现象)。镜筒轴向定位面与机身镜头座的配合应紧密、无缝隙、无磨损、无松动、无晃动。镜头的装卸应简便迅速。镜筒各部分之间应无松动。

4. 具有镜间快门的摄影镜头，其镜间快门应能精确、可靠地工作，各挡快门时间应准确。快门叶片上应无油污。

5. 自动或半自动变焦的变焦距摄影镜头，当正、逆方向自动或半自动变焦时，变焦环的转速应平稳、均匀，不应有忽快、忽慢的颤抖现象。

三、成像性能的简易检验

1. 挡角检验

挡角指摄影镜头成像时，曝光窗的某一或某几角无影像的缺陷。

只需把摄影镜头安装到照相机或电影摄影机上，收小光圈，针对均匀的明亮物体取景，就可通过单镜头反光取景器观察出画幅四角是否有挡角现象。检验变焦距镜头时，应将镜头依次调至不同焦距状态加以检验，以防在某一焦距处出现轻微挡角现象。

2. 畸变检验

畸变像差将使所摄影像与被摄景物之间在形状上产生较大差异，横不平、竖不直，严重破坏画面的视觉效果。

把摄影镜头安装到单镜头反光照相机的机身上或直接取景的摄影机上，通过取景器观察近距离处的门、窗、橱、柜、建筑、日光灯管等物体的直线条轮廓边，若位于画面边缘的物体上与画幅边框相平行之直线条变成弧线状，则说明该镜头存在畸变像差。直线条产生的变形愈明显，则畸变愈严重。对于拍摄矩形画幅的照相机，由于画幅短边距离画幅中心较远，畸变像差相对较

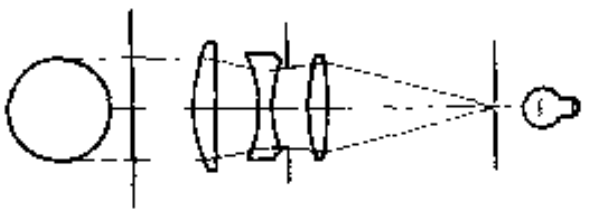
大，故此尤其应认真检验位于画幅短边处且与画幅边相平行之直线条的畸变大小。

检验变焦距镜头时，应先后将镜头变焦至各焦距值处，依次检验有无畸变像差。

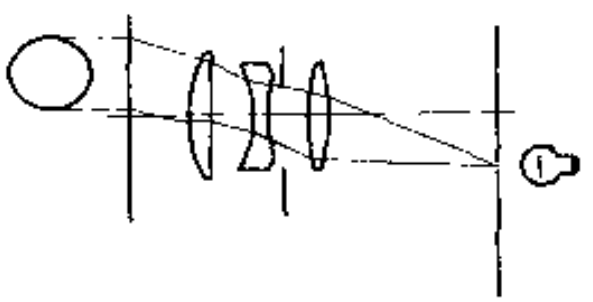
3. 像场照度均匀性检验焦

购买短焦距摄影镜头时，应安装到单镜头反光照相机上，对着亮度均匀的物体（如蓝天），通过取景器检验画面是否存在中心明亮，四角很暗的明显缺陷。

摄影镜头渐晕程度的检验方法如下：在摄影镜头前端放置一磨砂玻璃或白纸，在像方焦平面处放置一挡光屏，屏中央扎一小针孔，孔后放置一照明灯，依次使针孔位于镜头光轴上及视场边缘，观察磨砂玻璃上光斑形状的变化。如图 6—2 所示。当针孔位于像场边缘时光斑形状缩小强烈者，表示该镜头的像场照度均匀性较差。



a.



b.

图 6—2　渐晕的检验

4. 调焦精度检验

把摄影镜头安装到照相机或电影摄影机上，开大光圈，转动调焦环至最近调焦距离挡，将磨砂玻璃磨砂面朝前地放置在曝光窗处，使磨砂面紧贴曝光窗平面即胶片片道平面（对于机身像面定位距比镜头像面定位距短的照相机或摄影机，尚需按照二者的差值，通过垫垫片将磨砂玻璃向后移，以使摄影镜头的理想像平面刚好与磨砂玻璃磨砂面的实际位置精确重合），然后开启照相机的 B 门（或转动摄影机手钮至遮光器闪开曝光窗），对贴在墙上的分辨率图案或报纸取景，并前后移动照相机或摄影机的位置，直至磨砂玻璃上的取景影像最清晰时为止（用放大镜观看），最后用皮尺度量一下该分辨率图案至曝光窗平面间的距离。若度量值与摄影镜头上所调节的调焦距离值精确相等，则说明摄影镜头的调焦精度高；反之则说明调焦精度低。

严格讲，“摄影镜头调焦精度”指调焦至 ∞ 挡时的“镜头像面定位距”精度与摄影镜头上其余各有限距离挡的“调焦距离刻线”精度之和。而上述检验过程中所检验的是“照相机或摄影机调焦精度”，即检验的是摄影镜头调焦精度与“机身像面定位距”精度之和；至于摄影者通过单镜头反光取景器的调焦验证精度，还包含了取景器调焦屏之成像平面沿光轴至摄影镜头定位端面的距离精度。

同理，对无限远处景物调焦，直至磨砂玻璃上的影像最清晰时为止（用放大镜看），然后检查此时调焦环是否准确指示在无限远挡。若有指示偏差，则说明调焦精度低。

有个别摄影镜头对最近距离处景物调焦时，可获得相当清晰的影像，但无论怎样调焦，无限远处的景物也不十分清晰，这表明该摄影镜头存在调焦误差。也有个别摄影镜头对无限远处景物调焦时，可获得相当清晰的影像，但无论如何调焦，最近调焦距离处的景物也不十分清晰，这说明该摄影镜头也存在调焦误差。

5. 成像质量检验

把两同焦距镜头先后装到照相机（或摄影机）上，将光圈开至最大，把磨砂面朝前的磨砂玻璃紧贴曝光窗平面，使磨砂面全正前方之分辨率图案的间距刚好为同一较近调焦距离值，开启 B 门（或移开遮光器），调节调焦环至该磨砂玻璃上影像最清晰，用高倍放大镜检查磨砂玻璃上两镜头各自所结成之影像的清晰程度，能分辨开的线条愈密愈好。

6. 光圈调节精度检验

在摄影镜头像方焦平面处放置一不透光黑薄板，板中央扎一小针孔，使小针孔位于镜头光轴上，用灯光照明该小针孔，则该针孔即作为点光源向摄影镜头投射出光束。在该镜头前端面放置一磨砂玻璃，并用直尺仔细度量在各挡光圈刻度下的实际有效光孔直径 D，然后根据公式（3—6）计算出其所对应的实际光圈系数值，并比较该计算值与光圈调节环所指示值之间的差异，若无差异则说明光圈调节精度高，反之差异愈大则光圈调节精度愈低（应先后从大向小和从小向大调至该光圈刻度处分别进行检验）。

7. 眩光检验

在照相机曝光窗处临时放置一磨砂面朝前的磨砂玻璃，针对一明亮小灯泡取景，并令该灯泡的影像位于取景画幅的某一角处，尔后仔细观察磨砂玻璃上实际所结成的该灯泡的幻像具体有多少，以及幻像的明亮程度如何。其中所成灯泡幻像的数目愈少，愈暗淡，则该被测摄影镜头的杂光愈少。

四、拍摄检验

在照相机或电影摄影机内装上胶片，安装上欲测摄影镜头进行实际拍摄，可以检验该镜头的综合成像质量和调焦精度。

1. 成像质量的检验

对摄影镜头成像质量进行拍摄检验的传统方法，是拍摄分辨

率标板（参见图 3—42、3—45、3—46 所示）。

拍摄时将照相机或电影摄影机安装在稳固的三脚架上，使摄影镜头光轴通过分辨率标板中心并与该标板垂直，对分辨率标板进行均匀照明，开大摄影镜头光圈，按该标板所要求的影像放大率调节好摄影距离，并进行正确曝光，再经标准显影后，用 30×显微镜检查底片上的影像清晰度。能分辨开的线条对数愈多、愈密，则愈好（参见第三章第四节三中有关内容）。

若没有分辨率标板，也可针对影调细腻、明朗、层次丰富的景物进行拍摄，然后比较各镜头所摄影像质量，进行间接判断。

2. 调焦精度的检验

检验摄影镜头调焦精度的传统方法，是拍摄景深分辨率标板，该标板表面有一排排成直角的凸起，如果把该标板呈 45°角放置，则宛如一个阶梯，在各台阶的同侧表面上，各贴有相同的分辨率图案。如图 6—3 所示。

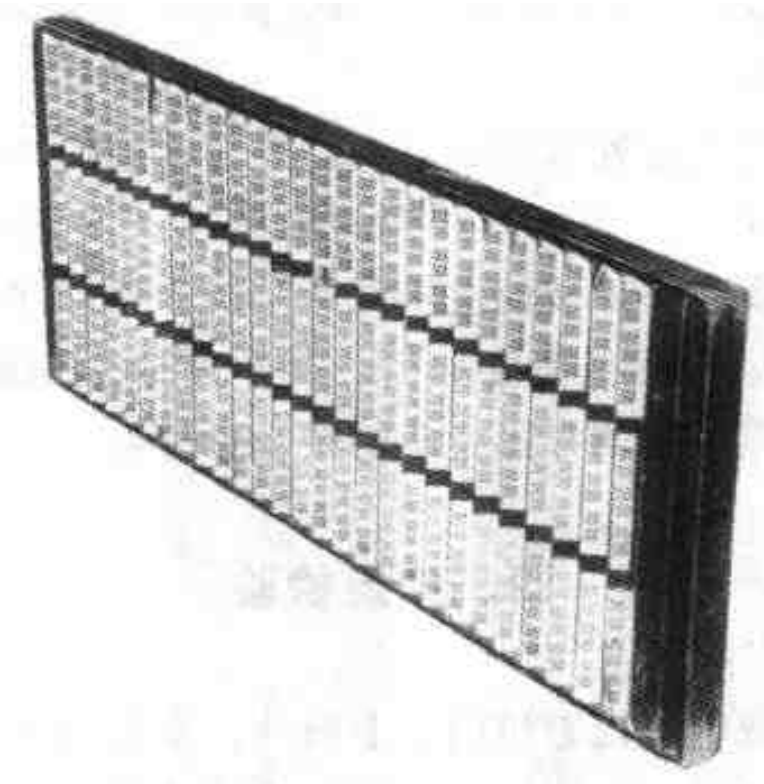


图 6—3　景深分辨率图板

具体拍摄和检验方法如下：把已安装好待检摄影镜头的照相

机或电影摄影机稳妥地固定在三脚架上，将摄影镜头光圈开至最大，调焦环调至最近调焦距离的刻线处；把景深分辨率标板放置在摄影镜头正前方，使该标板与镜头光轴成45°夹角（此时标板各台阶上所贴之分辨率图案必均与照相机或摄影机内之感光胶片平面平行），使镜头光轴刚好通过标板中心（即带箭头的那组分辨率图案的中心）；并使标板中心那组分辨率图案至照相机或摄影机感光胶片平面间的距离，精确等于上述最近调焦距离值（用皮尺度量）。拍摄并冲洗出底片后，用显微镜或高倍放大镜检查该底片，若带箭头那组分辨率图案最清晰，则说明该镜头调焦精度高；反之若另外一组分辨率图案最清晰，则说明该镜头有调焦误差，该最清晰图案与调焦图案（即带箭头那组图案）各自所在台阶之间的垂直间距愈大，则说明该镜头调焦误差愈大。

也可用下述简易方法检验调焦精度：将一张报纸平展地贴在一很平的木板上，并使报纸与被检验镜头的光轴成45°夹角，使报纸中间某一竖行文字至胶片平面的距离刚好等于该镜头最近调焦距离（将该竖行文字作上标记），再把被检验摄影镜头光圈开至最大，调焦环调至最近调焦距离处，然后进行拍摄。通过检验底片上哪一竖行文字最清晰，即可判断出该镜头调焦精度的高低。

当经上述检验发现某一摄影镜头存在调焦误差时，应再具体分析出该误差系由下述哪一原因引起：摄影机或照相机机身存在像面定位距误差，摄影镜头存在像面定位距误差，摄影镜头存在调焦标尺刻制误差。此后才可对症排除误差。

在一般情况下。只要最近调焦距离刻度准确，则整个调焦环上的其它调焦距离刻度也将是准确的（必要时，可再检验无限远或中等距离处的调焦精度）。

五、仪器检验

目前，检验摄影镜头技术性能指标的仪器很多，若按用途分类，则常见者有：检验成像质量、调焦精度、相对孔径的三类仪器。(此外尚有检验焦距、杂光系数、彩色贡献、像面照度均匀性等仪器)。

1. 光具座

光具座（参见图 3—39 所示）是一种综合检验仪器，备有星点和分辨率两类检验标板，既可检验摄影镜头的成像质量，又可检验镜头像面定位距精度。还可测量镜头焦距、后顶焦距、出入瞳直径等参数。

例如，在光具座上安装星点板后，可进行星点检验；安装分辨率板后可通过分辨率高低，既检验成像质量优劣，又检验镜头像面定位距精度的高低。

2. MTF 和 OTF 检测仪

调制传递函数和光学传递函数检测仪是检验摄影镜头综合性能优劣的新型设备。其检验精度高，且更符合被检验摄影镜头的实际拍摄效果，但设备复杂，价格昂贵。

目前日本检验摄影镜头 MTF 性能时应用较多的仪器，为恩基恩斯·马特拉（Engins Matra）公司制造的阿克玛特（Acomat）牌 MTF 检测仪。日本光学研究行会也集体研制出了 JOERA C-4 型 OTF 检测仪，其光学部分如图 6-4 所示。图中 1 为照明光源、2 为聚光镜头、3 为狭缝、4 为镜头座回转中心、5 为被测摄影镜头、6 为平行光管镜头、7 为傅立叶分析系统。

世界著名的德国卡尔·蔡司（CARL·ZEISS）光学公司，生产了欧波同（OPTON）KⅥ型 MTF 检测仪。该仪器的物镜有 325mm 和 1200mm 二挡焦距可供选择，二者所对应的光学隙缝调节范围

分别为 50 ~ 200μm、30 ~ 150μm。该仪器共有 10、16、20、25、32、40、50、64、120 线对/毫米九挡空间频率可选择。光源为安装专用白光滤光片的 220V、60W 灯泡。

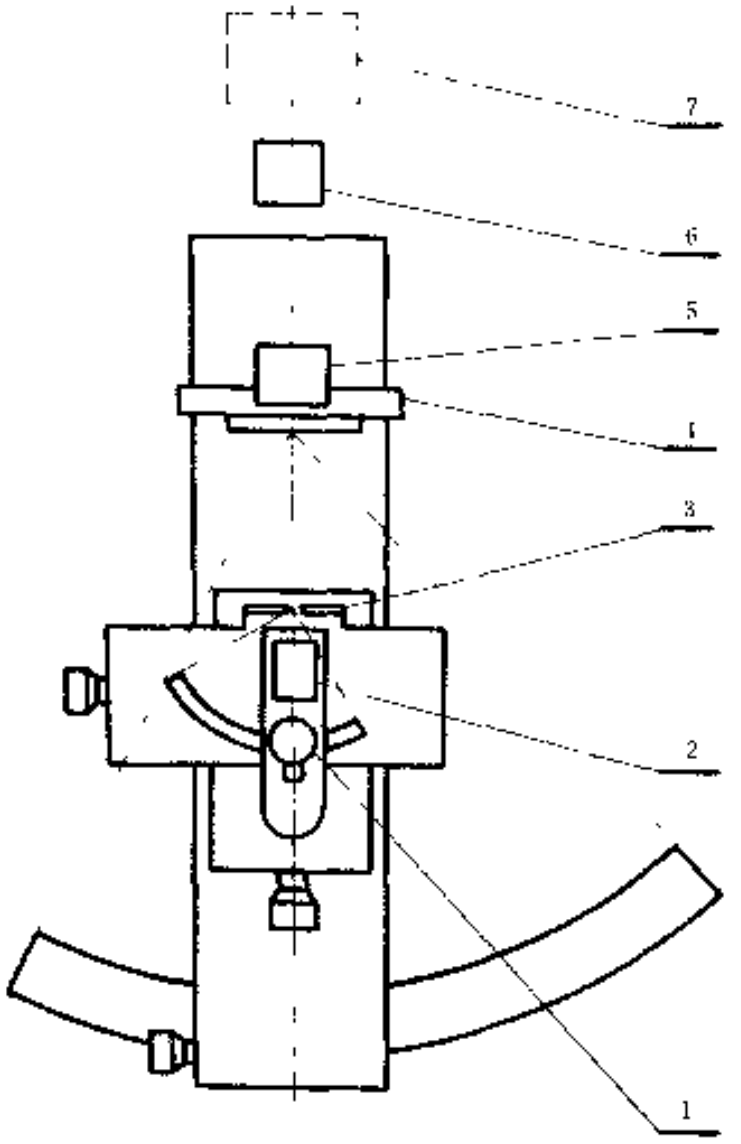


图 6—4　JOERA C-4 型 OTF 检测仪

3. 分辨率投影检测仪

分辨率投影检测仪是检验摄影镜头分辨率高低的设备，该设备由照明光源、聚光系统、分辨率标板、镜头夹持器、机身五部分组成。

将被检验摄影镜头安装在仪器的夹持器上，接通电源，用该被检镜头将分辨率标板投影到银幕上并调焦至像质最佳，根据银幕上所成影像能分辨出之线对的多少，可判断出该镜头的成像质

址高低，并可通过此时镜头的调焦距离刻度值与实际投影距离一致与否，间接检验出该镜头的调焦精度。

4. 调焦检查仪

调焦检查仪是检测摄影镜头调焦距离标尺刻制精度与机身像面定位距精度之综合高低的仪器。电影界常将其称为焦点检查仪。调焦检查仪在电影界应用的非常广泛。

调焦检查仪实质是一台双分划板式自准直仪。该自准直仪能同时起平行光管和前置镜的作用：从自准直仪物镜发出的光线是平行光线，故此时的作用与平行光管相似；而被测表面反射回的光线在重新进入自准直仪物镜后，其情况又与普通前置镜相同。

调焦检查仪检验摄影镜头调焦精度的工作原理如图 6—5 所示。图中 1 为光源、2 为聚光镜、3 为辅助分划板、4 为分光棱镜、5 为物镜、6 为目镜分划板、7 为目镜、8 为被检验的摄影镜头、9 为反光镜。在辅助分划板 3 的镀银面上一般刻有透明十字线，在目镜分划板 6 上刻有标尺刻线。由于采用双分划板式，故自目镜中所观察之影像的衬度良好，检测精度较高。分划板 3 和 6 上的图案皆位于物镜 5 的物方焦平面上。分光棱镜 4 的胶合面上镀有析光膜，它可使投射到上面的全部光线一分为二：一部分透过去，另一部分被反射而转折 90°。测量时应将被测摄影镜头安装在照相机或电影摄影机上，使镜头的光轴与自准直仪的光轴重合，反光镜 9 的反光面应严格位于曝光窗平面处。

由图 6—5 可知，被灯泡 1 照亮的辅助分划板 3 上的图案，经分光棱镜 4 反射和物镜 5 折射后，成像于该检查仪前方无限远处，即出射光线为平行光线。由于平行光线经摄影镜头会聚后，将成像于该镜头的焦平面上，因此平行光管发出的成像光线，被已调焦至无限远位置的镜头 8 会聚在其焦平面处——在反光镜 9 的反光表面处结成清晰影像。该反光镜则将上述影像重新向镜头 8 反射回去。由于反光镜 9 位于镜头 8 的焦平面处，故反射回的

光线经镜头 8 后，将重新变为平行光线，射入调焦检查仪内，并成像于物镜 5 的焦平面处，即经分光棱镜 4 在目镜分划板 6 处，结成辅助分划板 3 上之图案的清晰影像。

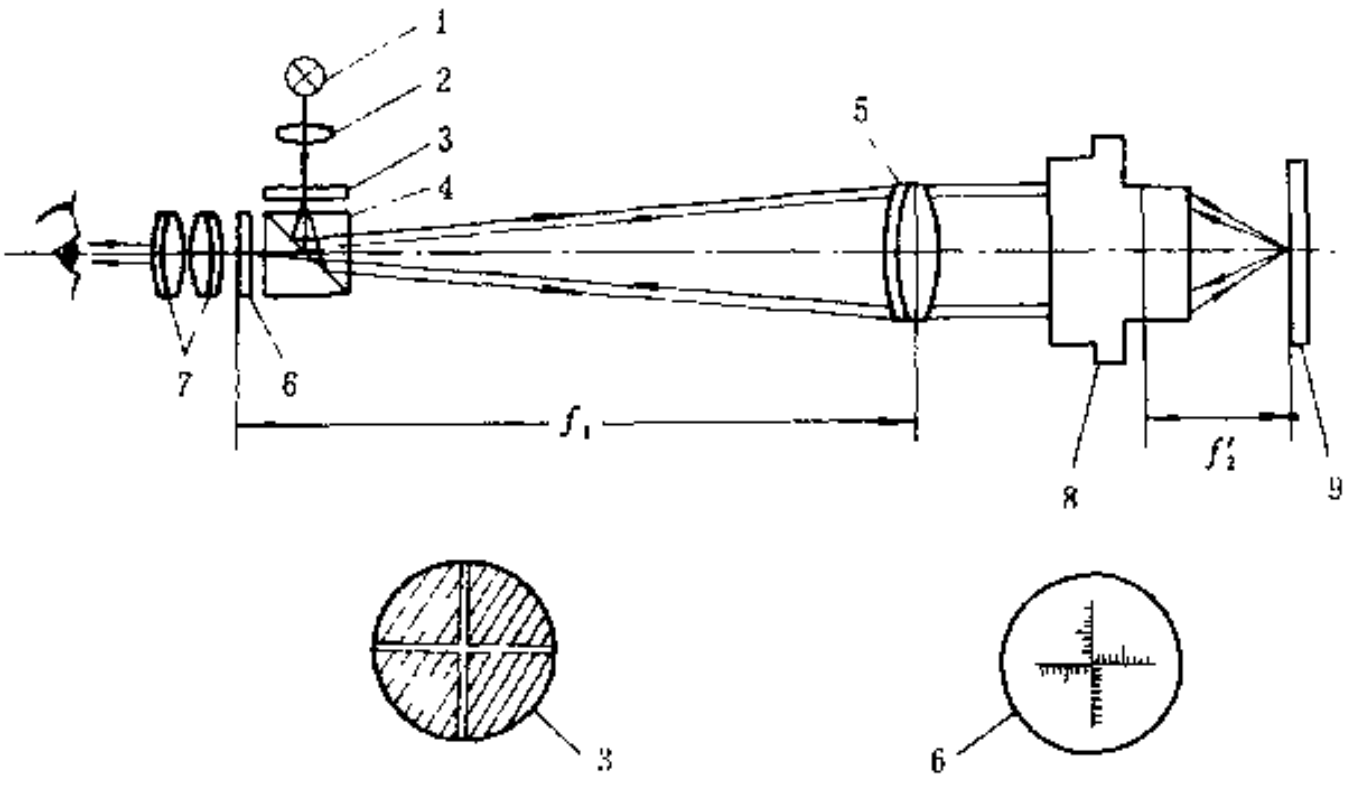


图 6—5　调焦检查仪

显然，如果摄影镜头 8 存在调焦误差，则调至无限远挡时，分划板 3 上的图案将无法在反光镜 9 上结成清晰锐利的影像，从而使分划板 6 上所看到的影像不清晰。

检验时需转动被验摄影镜头的调焦环，检查能否从目镜 7 中看到最清晰锐利的图案影像，以及该图案的影像最清晰时调焦环是否刚好位于∞挡。

英国泰勒·哈勃森公司（TAYLOR HOBSON）生产之调焦检查仪的工作原理与上相似，若被测摄影镜头∞挡调焦无误差，则可自目镜中看到清晰的白方格黑方块图案，而像面定位距偏长或偏短时，将分别看到品红色方格绿色方块或淡绿色方格紫红色方块的图案。

有的调焦检查仪不但可以检验摄影镜头调焦至∞挡的调焦精度，而且可检验该镜头调节至任一挡调焦距离刻度时的调焦精度。在此类检查仪中，物镜5（或分划板3与6）一般可沿光轴方向相对分划板3与6（或物镜5）做前后调节，且在调节机构上标有一系列相应的调焦距离刻度值。当将该检查仪调节至任一刻度值时，即可检验摄影镜头调至相同调焦距离刻度上时的调焦精度。由于该检查仪上物镜5的焦距值远较被测摄影镜头的焦距大，故调节检查仪上的刻度值时，物镜5与分划板3、6间的相对移动距离，一般远比被测常用摄影镜头调焦至同刻度时的镜筒伸缩量大，因而此类调焦检查仪的检验精度较高。例如法国SO-RO·ELEC-TRO OPTICS调焦检查仪，其物镜至像平面的间距为405毫米，该仪器可测量的调焦距离为：1、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2、2.1、2.2、2.3、2.4、2.5、3、3.5、4、5、7、、10、15（m）、∞。

德国卡尔·蔡司公司（CARL ZEISS），专门为阿莱弗莱克斯（ARRIFLEX）电影摄影机的摄影镜头，研制了一种新型调焦检查仪——MTF像面定位距检查仪（MTF FLANGE FOCAL DISTANCE TESTER）。由于该仪器采用了调制传递函数原理，因而检测精度很高，可达±0.005毫米，且操作简便、迅速、读取方便。该仪器的平行光管焦距为776毫米，被测镜头的最大入瞳为80毫米，最大焦距为350毫米、最大长度为400毫米（自影像平面到镜头前端面），光谱响应为日光，在光轴上MTF测量为50线对/毫米。检查仪的电源为220V、150W，体积为770毫米×600毫米×460毫米，重70kg。如图6—6所示。

5. 光圈系数检测仪

常见光圈系数检测仪有：光圈面积检测仪、EV值检测仪和光圈投影检测仪三类。

光圈面积检测仪（DIA METER）可直接检测F数精度，例如

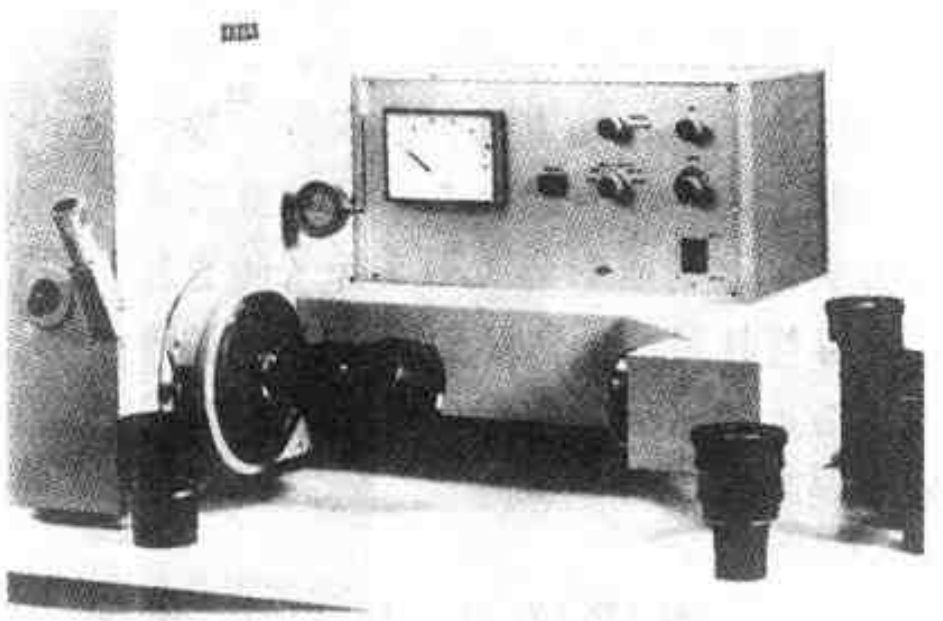


图 6—6　蔡司像面定位距检查仪

日本京立電機（KYORITSU Electric）公司的 AF-4DLB 型、日本壶坂電機（TSUBOSAKA Electric）公司的 SMD-81 型光圈面积检测仪。

EV 值检测仪可以精确测试出摄影镜头任二挡光圈数之间的光通量差值，并以 ΔEV 值表示出来。若选定 D_0 为某摄影镜头的标准入射光瞳直径，并校准该仪器的系统误差，则把光圈调节环调至任一挡处的实际入射光瞳直径 D，即可由下式求出：

$$D = D_0 \cdot \sqrt{2}^{\Delta EV} \tag{6-1}$$

将计算出的 D 值代入公式（3—6）中，可计算出此刻摄影镜头的实际光圈数值，从而可迅速、精确地比较出摄影镜头光圈调节环所指示的 F 数，与实际 F 数之间的百分比误差（一般应 ≤ ± 5%）。

常见 EV 值检测仪有：日本京立電機公司的 CEE-1A5 型（附 LB-560A 型光源箱）、EF601 型（为综合检测仪、附 LB-2023 型光源相），日本壶坂電機公司的 7PE12 型（附 LSB-34 型光源箱），日本横河電機（YOKOKAWA Electric）公司的 7PES-12 型等型号。

光圈投影检测仪可间接检测 F 数精度：在被测镜头像方焦点处之点光源发出的光线，经该镜头会聚成平行光束后投射出去。仪器上的物镜可将该平行光束放大后投影在检测屏上。测试者直接度量出检测屏上的光斑直径后，再除以此投影检测仪的物镜放大倍率，就可获得此刻摄影镜头的实际入瞳直径，进而可通过公式（3—6）求得与其对应的实际 F 数，比较被测摄影镜头光圈调节圈上此刻所指示的 F 数与上述实际 F 数，就可获得该挡光圈数刻度的百分比误差。

第三节 摄影镜头的正确维护方法

摄影镜头的结构非常精密，镜片和表面镀膜的强度均较低，为了长期保证摄影镜头的成像质量，应严格遵循正确的使用与维护方法。

一、正确维护方法

1. 忌讳拆卸

因摄影者一般无光学测试仪器和专用装拆工具，又无丰富的装配、调校经验，故不宜自行拆卸摄影镜头。否则随意拆装后，很难恢复原镜头的装配和调校精度，从而影响该镜头的成像质量。自行随意拆装，甚至可能造成无法修复的损伤，严重者将使镜头报废。

2. 正确使用

应严格遵循摄影镜头使用说明书中的要求，正确操作和使用。

自机身上卸摄影镜头时，应先释放镜头锁钮，不可直接硬拧，以防损伤锁紧机构（老式螺纹联接式镜头没有锁紧机构）。

装、卸摄影镜头时应注意正确的旋转方向，以免损伤镜头联接机构。例如，在卸镜头时，有的镜头要求应反转镜筒，有的镜头要求应反转机身上的锁环，而尼柯摄影镜头（供安装在尼康F5、FM2等型照相机上），却要求正转镜筒才能卸下该镜头。阿莱弗莱克斯ⅡC型35毫米电影摄影机要求只需捏紧二只锁钮，就可直接将镜头向外拔出。

装、卸具有镜间快门的摄影镜头时，一般应先给快门上弦，尔后才可开始装或卸镜头。

装镜头时应使位于镜头后端和机身镜头座上的安装标志（一般各为一红点）彼此对正，将镜头后端插入镜头座内，插到底，再按要求的方向旋转到终点，直到听到“咔嗒”一声锁牢声（螺纹联接则较简单——只需拧紧即可）。

装、卸镜头时，手应握持摄影镜头的镜筒部分进行操作，不应握持调焦环或变焦环、光圈调节环转动镜头。因这几个调节环的限位机构一般不宜承受较大的扭力，否则容易受到损伤。

某些老式鱼眼摄影镜头要求预先升起反光镜，尔后才可安装该鱼眼镜头，以防单镜头反光照相机的反光镜在安装时或拍摄时被撞坏。

某些变焦距摄影镜头的微距挡（MACRO）有锁紧装置，欲调往微距状态时需先释放该锁钮，不可直接硬扭。

某些具有自动光圈功能或程序快门功能的摄影镜头有锁紧装置，在调往或调离AE挡、P挡时应先释放该锁钮，请勿直接硬拧。

3. 严防脏污

摄影镜头因维护不当而脏污后，将直接影响到其成像质量，故平时应注意以下几点：

暂不拍摄时应随手在镜头前端盖上镜头盖。对卸下的镜头，还应立即盖上后端保护盖。

平时可在摄影镜头前方安装一片滤紫外线的 UV 镜或天光镜，以便用价格低、又不影响曝光量的滤光镜，代替摄影镜头承受可能遭受到的损伤与尘污（用长焦或变焦镜头逆光拍摄时，一般建议不加 UV 镜和天光镜）。

平时应尽可能防止灰尘等落到摄影镜头上。在有风砂或粉尘的环境下拍摄时，应该事先用保护布或透明塑料袋等将摄影镜头的镜筒和照相机、摄影机机身罩严，只留出镜头前端的镜片。

不要对着镜头说话，以免镜片表面落上呈酸性的唾液星。

应严防手指误碰触到镜头的镜片表面，以免留下手指印的痕迹（手上的汗渍多呈碱性），否则手指印痕不但影响镜头的成像质量，时间长后还易损伤镜片表面的镀膜层。

4. 谨防损伤

平时应注意防止摄影镜头受到剧烈震动，为此应亲自随身携带，而不宜托运。

在颠簸路面上行驶时，宜将摄影镜头背在身上或拿在手上，以减轻震动。

为改善摄影镜头的抗震性能，不拍摄时应把摄影镜头的调焦环调至无限远挡，将光圈调至全开状态（对于供单镜头反光照相机配套并具有自缩光圈功能的摄影镜头，若长期不用时，则应将摄影镜头自照相机上卸下，并应使收缩光圈的弹簧处于松弦状态之下），使变焦距镜头和微距镜头前伸的镜筒向后缩回至最短状态。

严防摔磕、碰撞，尤其应防止三脚架连同摄影镜头等被人碰倒、被风吹翻。

使用三脚架时应注意锁牢各腿上的板手，并应将照相机、摄影机、摄像机拧牢在云台上、锁死。

手持摄影时，应将照相机背带挎在脖子上，以防万一失手而跌落。

使用没有“镜头锁钮”的照相机时，应经常注意检查镜头有无松动（尤其是俯拍前），以防患于未然。

注意防止挤压，防止与其它物品摩擦。携带时请勿与坚硬、锐利的物品放在同一提包内。

具有镜间快门的摄影镜头被卸下而长期不用时，请及时释放掉已上紧的快门弦（待使用时再临时重新上弦），以延长镜间快门的寿命。

主动式自动变焦距摄影镜头被卸下而长期不用时，请及时卸下电池室内的电池，以防日久电池因腐蚀而漏出的电解液渗入摄影镜头内部。

5. 轻轻操作

摄影镜头属于精密仪器，比较娇嫩，故操作时力量宜轻、动作应和缓，不宜用力过大、过猛（尤其在操作中遇有较大阻力时），以防损伤镜头。例如，使用推拉式变焦距镜头时，变焦操作应柔和，不宜过猛。

6. 注意使用环境

拍摄过程中应注意防止日晒，防止雨淋、防止风砂（风砂进入镜头内的镜片上，既难于清洁又影响成像质量，并且落在调节机构上的尘砂还易加速零件的磨损）。

冬天应注意防止温度骤变，以免胶合镜片开胶。为此，从寒冷室外进入温暖室内时，应使摄影镜头缓慢升温，反之，若急忙取出摄影镜头，则不但胶合透镜易于开胶，而且镜头上极易凝结出水珠，既不好擦、又易使镜头生锈。

摄影时应注意防止腐蚀性气体（如酸蒸汽）及水蒸汽的侵袭。

拍摄海浪、炼钢等时，应防止海水、钢花等溅落到摄影镜头上。

7. 改善存放条件

摄影镜头应存放在干燥、阴凉、通风的地方。

存放前应吹拂掉镜片上的灰尘，擦去镜片上的手印、油污、水渍等，并应用清洁、柔软的纱布将镜筒上的汗渍、油污、灰尘等擦拭干净。

防潮湿：长期不使用摄影镜头时，可将其保存在储有干燥剂（最好为变色硅胶）的密封玻璃器皿中、或将其密封在装有干燥剂的完好塑料袋内（尤其是在霉雨天气时）。在保存中若发现变色硅胶的颜色改变后，应立即取出该干燥剂加以烘干，尔后再使用。

防腐蚀：存放镜头时应远离腐蚀气体，尤其注意不应放置在装有卫生球、樟脑片的大衣柜内，因这些挥发气体对镜头非常有害。

防烘烤：摄影镜头在存放时应远离暖气、火炉，坐汽车时不要放在汽车发动机旁。

防重压：存放时，勿在摄影镜头上堆压物体。

8. 宜吹不宜擦

摄影镜头表面落有灰尘时，可用橡皮吹气球（可用医用洗耳球代替）吹掉。吹前应在空气洁净处把吹气球反复捏几次，让吹气球内的原有微尘吹出，并吸进洁净的空气，以备吹拂镜头。吹时不要把吹咀静止在镜片上的一个地方在那反复捏吹气球，因为这种吹法只会把灰尘从镜片的这一部位吹到另一部位，何况反复在一个地方捏吹气球，将把吹到空气中的灰尘又吸入球中，尔后再次到镜片表面上，故很难吹净。

正确吹法如下：左手拿着镜头使被吹表面朝下，右手拿吹气球自下向上吹，以使吹走的灰尘不致又落在镜片上；吹的过程中还应边吹边摆动吹嘴，使吹出的快速气流象扫帚一样从镜片这一侧向另一侧扫去，以达到真正把灰尘吹掉的目的（而不至出现灰尘在镜片上被吹来吹去却又吹不掉的弊端）。

平时不要轻易用干燥的擦镜头纸或脱脂棉擦拭镜片上的手印痕、水渍、油渍。因为干擦很难将这些污痕擦掉，故势必用力反复摩擦，从而会使镜片镀膜层产生微观甚至明显损伤。也不宜经常沾镜头水擦拭镜片，因为若频繁地擦拭则时间一长，势必将镀膜层擦花、擦掉，甚至把镜片擦毛。而把镜片擦毛后对镜头成像质量的影响，要远比新镜片表面附有微量灰尘时的影响大。

尤其注意不应用擦镜头纸等去直接擦镜片表面上的灰尘。如果放大来看，镜片上的灰尘就好象是一颗颗砂粒，而我们很难做到象用小铲铲起石块那样，把砂粒从镜片表面轻轻铲起。用镜头纸等擦灰尘，实质是通过摩擦现象将灰尘擦走，显然，在擦的过程中灰尘将象坚硬锐利的研磨剂那样打磨镜片表面，从而极易使镜片镀膜表面产生明显划伤。

正确的清洁镜头方法如下：

1. 若镜片表面仅落有灰尘，则可用吹气球吹掉。有条件的，也可买一筒专供吹镜头灰尘用的“气体清洁剂”来吹（使用时应使该气体清洁剂的铁筒保持正立状态，不应横置或倒立使用）。经吹拂后若仍有个别微小灰尘未吹掉，则可以不去理它；因这点微量灰尘对成像的影响是人眼辨别不出来的。

2. 若镜片表面有手印痕等污迹，则应先用吹气球吹掉镜片上的灰尘，然后用细塑料棍或柳木棍端部卷裹上长纤维脱脂棉（卷裹成棉球状且不可用手指触摸），沾微量乙醚乙醇混合液，其乙醚、乙醇的混合比一般为 80% 比 20%（天气干燥时，也可为 70% 比 30%，其中乙醇应为化学纯或分析纯级的），**轻轻**擦除（在应急场合，也可用纯乙醇代替上述混合液，在沾溶液轻轻擦后，应立即用未沾溶液的干净脱脂棉球，将未迅速蒸发的余迹擦去）。注意：务必遵守先吹拂，后**轻轻**擦拭的操作步骤。

若整个镜头全脏了，擦时应自镜片中心开始，沿阿基米德螺旋线方向逐圈向外擦拭，并且边轻轻擦边转动棉花棒，以便始终

用棉球的干净部位擦镜片。若仅镜片局部有手印，则可在该手印处自镜片中心直接向外缘方向轻轻擦拭。

二、使用注意事项

清洁和维护摄影镜头时，应注意以下事项：

1. 请勿用麂皮、手帕、衣物等粗糙不清洁的物体擦拭镜片。其中麂皮表面最粗糙，也最易藏污纳垢，从而最易划伤镜片。

2. 目前国外有些袖珍 135 照相机的摄影镜头，其部分镜片采用光学塑料制成（例如日本产佳能 Snappy20 型袖珍 135 照相机，其四组四片式摄影镜头的第四片透镜，即为塑料非球面透镜；又如柯尼卡 EFJ 自动日期型袖珍 135 照相机，其四组四片式摄影镜头的第 2、3、4 片透镜均为塑料镜片，且均镀了增透膜）。这类光学塑料镜片不允许用镜头水等有机溶剂擦拭，否则将造成不可挽救的损伤（如镜片龟裂、变得不透明等）。光学塑料镜片很轻，硬度很低（很软），极易被划伤，故只宜用吹气球吹拂清洁，只有必要时，才可用沾微量蒸馏水的棉球非常轻轻地擦拭。

3. 不宜用供医疗消毒的 70% 浓度的卫生酒精擦拭镜片，因这类酒精中含的水份较多。

4. 不宜用镊子夹棉球擦镜头，以免不小心用镊子尖端划伤镜片。

5. 镜片上有灰尘时不宜用嘴吹，以防吹上唾液星。

6. 镜片上有污痕时严禁用牙膏打磨。

7. 如果采用镜头刷清洁镜头，则应注意保持刷毛的清洁，勿用手触摸刷毛，不用时应将刷头缩入套内存放。使用时应遵循先吹后刷的操作步骤，每轻轻刷完一下，即应用手指轻轻弹扣几下刷柄，以震落沾附在刷毛上的灰尘。刷毛用脏后应及时用酒精涮洗洁净。

8. 镜头落入海水后应及时清洗，以免锈腐。

9. 请勿往摄影镜头的调节环处随意加注润滑油，以免其流入镜头内部沾污透镜表面，或流至光圈叶片、快门叶片处使之粘滞不灵活。此外，油膜极易粘附灰尘，从而加速调节机构的磨损。

10. 装卸滤光镜时应注意螺纹处的清洁，勿硬拧、狠转，以防损伤联接螺纹。若滤光镜锈死在镜头上，可在联接螺纹处滴微量（一小滴）煤油，并转动镜头使油渗入螺纹内，然后轻轻弹敲联接部位，以利拧下滤光镜。

第四节　摄影镜头的发展趋势

今后，随着科学技术的飞速发展，新型光学材料将不断诞生，光学制造工艺技术水平将不断迈向更高精度，光学设计理论也将不断创新、完善，从而为光学界进一步提高摄影镜头的技术性能开创了广阔的前景，为满足摄影者日益增高的要求提供了有利条件。

譬如，今后高折射率低色散光学玻璃将日益普及，已诞生的变折射率光学玻璃有可能进入实用化阶段，进而步入摄影镜头领域，纯度更高的光学玻璃将在太空失重状态下冶炼，尺寸愈来愈大的超高精度光学球面透镜和非球面透镜将不断问世，更先进、新颖的光学自动设计程序亦将不断诞生……，这一切必将为进一步提高摄影镜头的技术性能开创出更广阔的前景，从而为满足摄影者日益增长的要求提供了有利条件。

展望未来，摄影镜头的发展趋势大体如下：

1. 大孔径

增大摄影镜头的最大相对孔径对低照度下的摄影非常有利。电影摄影者对大孔径摄影镜头尤感兴趣，因可便于利用现场光线

照明，既节省照明灯的瓦数、数量和电费，又便于携带，还可获得更强烈的影像虚实对比效果。

2. 高透光率

合理选用多层镀膜可提高透光率、减少眩光，增强影像对比度，从而对逆光摄影尤为有利。

3. 高分辨率、高明锐度

优良的 MTF 曲线可使摄影镜头同时兼备高分辨率和高明锐度的性能，从而对获得优异成像质量非常有利。

4. 优良的彩色还原

彩色摄影的日益普及，使摄影者愈加关心摄影镜头彩色还原性能的优劣。

5. 无畸变

校正短焦距摄影镜头和变焦距摄影镜头的畸变像差，已愈来愈受到摄影者的关注。

6. 高倍率

在保证成像质量的前提下提高变焦距摄影镜头的变焦倍率，已是广大新闻摄影工作者和电影摄影者的殷切希望。各光学公司也正在竞相全力研制。

7. 小体积

缩小摄影镜头的体积，可以更便于手持摄影和携带。

8. 超近摄

由于变焦距镜头上的超近摄功能（MACRO）可扩大该摄影镜头的应用范围，以至受到摄影者的欢迎，因而正得以迅速推广，成像质量也在不断提高。

9. 系列化

为了适应各类摄影和不同摄影者的需要，各种长、中、短焦距的摄影镜头和各类特殊摄影镜头的配套系列化正在形成。

10. 自动化

由于摄影镜头的自动化程度提高可减轻摄影者的操作，从而深受新闻摄影者和业余摄影者的喜爱，故各类自动化摄影镜头近年不断问世。首先，伴随着照相机、电影摄影机、电视摄像机自动测光机构的诞生，出现了自动调节光圈大小的摄影镜头；其次，伴随着变焦距摄影镜头在电影、电视上的广泛采用，出现了可以通过开关控制的电动变焦距摄影镜头；近来，伴随着自动光电测距装置的诞生，又出现了自动调焦摄影镜头。

随着照相机自动调焦技术的迅速发展和日益完善，不久的将来，有可能运用到电影摄影镜头上，实现电影摄影中“跟焦点”的自动化。

总之，一系列新型、优质的摄影镜头定将伴随着科学技术的发展而不断问世，从而为摄影艺术创作提供更广阔的驰骋天地，并获得摄影者的喜爱。

思　考　题

1. 如何检验摄影镜头的品质？
2. 摄影镜头的正确维护方法与使用注意事项？

附 录 说 明

为使表格简炼，以利于制版，本附录之附表中的各栏目、均用字母表示，各字母的意义和单位如下。

f：焦距，单位为毫米。若表中为中间隔一短横线的一小一大两数值时，则表示为变焦距摄影镜头的变焦范围。

f_B：后顶焦距，单位为毫米。

f_b：像面定位距，单位为毫米。

f×：变焦距摄影镜头的变焦倍率。

f_{2x}：使用变焦距镜头上内装 2× 倍率镜时的变焦范围。

G—E 或 G/E、E/G：表示摄影镜头的光学结构，G 为透镜组数，E 为透镜片数。

θ 或 $\theta_{水}$、$\theta_{垂}$、$\theta_{对}$：θ 表示视角，$\theta_{水}$ 为水平视角、$\theta_{垂}$ 为垂直视角、$\theta_{对}$ 为对角线视角。

d：清晰像场直径，单位为毫米。

F 或 F_{min}、F_{max}、T：F 表示光圈系数（若表中为中间隔一短横线的一小一大两数值时，则表示为该摄影镜头的光圈调节范围），F_{min} 为最小光圈，F_{max} 为最大光圈。注 T 时为 T 值光圈，注 F、f/或未注字母者均为 f/制光圈。

S_{min}、S_M：S_{min} 为最近调焦距离，S_M 为微距（Macro）挡时的最近调焦距离，单位均为米。

m_{max}、m_m：m 为影像放大率，m_{max} 为最近调焦距离下的最大影像放大率，m_M 为微距（Macro）挡时的影像放大率。

b×h：为最小拍摄范围（指最近调焦距离处），b 为宽、h 为高，单位均为毫米。

Φ_t：滤光镜直径，单位为毫米。

$\phi \times L$：表示摄影镜头的外形尺寸，ϕ 为直径，L 为长度，单位均为毫米。

$L_{光}$：摄影镜头的光学长度，单位为毫米。

L × B × H：表示摄影镜头的外形尺寸，L 为长度，B 为宽度，H 为高度，单位均为毫米。

Q：重量，注 kg 者单位为千克，未注字母者单位均为克。

US $、HK $、DM、£、¥、SF：表示价格及货币名称。其中 US $ 为美元，HK $ 为港币元，DM 为西德马克，£ 为英镑，¥ 为日元（本附录中的日元单位均指“万日元”），SF 为瑞士法朗。

附录一 世界著名照相机用摄影镜头的种类与技术性能

1. 国产凤凰摄影镜头①

江西凤凰光学仪器（集团）有限公司创建于1965年11月，至今已有35年历史。当初创建时名为江西光学仪器总厂，系由上海照相机二厂与上海电影机械厂、南京江南光学仪器厂、南京测绘仪器厂、南京工卡模具厂等五家工厂部分内迁至江西德兴山区，共同组建而成。当初生产的第一种照相机产品为海鸥205型旁轴取景的35毫米照相机。

1988年2月，该厂为适应改革开放的国内形式，自山区迁厂至江西上饶市。

1996年该厂正式组建为江西凤凰光学仪器（集团）有限公司。目前，公司主要产品有照相机、光学镜头、望远镜、显微镜、影视设备、大地测绘仪器、水晶饰品等200多个品种，为国家大型二类企业。

1997年江西凤凰光学仪器（集团）有限公司又创立了凤凰光学股份有限公司。凤凰光学股份有限公司创建后，当年5月即获准以“凤凰光学”的名义在上海证交所上市，从而成为我国上市公司中的“光学行业第一股”。

凤凰光学股份有限公司主要生产照相机、摄影镜头、钢片快门、照相附件等相关产品。至今已经生产出几十种型号的35毫

① 国产照相机公司按拼音字母顺序排列。

米单镜头反光照相机，及35毫米袖珍照相机，数码照相机等。该公司产品质优价廉，大量出口国外，尤其该公司生产的钢片快门更是被日本诸多著名照相机厂家所采用。

附表1—1中所示为该公司目前生产的供35毫米单镜头反光照相机使用的摄影镜头的种类，及其技术性能。

2. 国产海鸥摄影镜头

上海海鸥照相机有限公司创建于1958年11月1日，至今已有42年历史。当初创建时名为上海照相机厂，系由上海照相机制造厂筹备处，与正丰五金工业社、大明誊写用品厂、海通工艺厂、施鹤记电镀厂、勤联文具厂等，合并而成。当初生产的第一种照相机产品为上海58-I型旁轴取景的35毫米照相机。

1979年上海照相机厂与上海照相机二厂等迁至上海松江，组建成上海照相机总厂。

1997年正式重组为上海海鸥照相机有限公司。该公司历史悠久，所生产的海鸥牌照相机大量出口，响誉中外。

上海海鸥照相机有限公司主要产品有照相机、光学镜头、照相附件、望远镜、水晶饰品等多品种产品。至今已经生产出几十种型号的35毫米单镜头反光照相机，及35毫米袖珍照相机，120照相机，数码照相机等。

附表1—2中所示为该公司目前生产的供35毫米单镜头反光照相机使用的摄影镜头的种类，及其技术性能。

3. 德国卡尔·蔡司（CARL·ZEISS）摄影镜头

卡尔·蔡司光学公司的厂址原本在德国耶那(JENA,现在民主德国辖区内)。第二次世界大战后,联邦德国重新建立了卡尔·蔡司公司,而民主德国也重新恢复了卡尔·蔡司·耶那公司(VEB Carl Zeiss JENA DDR)。联邦德国卡尔·蔡司光学公司的商标为CARL·

附表 1—1　　凤凰 135 照相机用摄影镜头

型　　号	G—E	θ	m_{max}	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
50mm F1·7	5—6	46°		22	0.45	52	63 × 46	210
135mm F2·8	5—7	18°		22	0.7	52	64 × 118	470
18—28mm F4—4·5	11—14	100.5°—75°		22	0.5	72	76 × 82	490
28—70mm F3·4—4·8	8—9	75°—34°	1:4	22	0.35	52	62.6 × 94	365
28—105mm F3·5—4·5	14—15	74°—24°	1:5	22	2.2	67	70 × 84	320
28—135mm F3·8—5·2	14—15	75°—18°	1:5	22	2	67	80 × 95	560
28—200mm F4—5·6	13—16	75°—12°		22	1.8	67	70.5 × 109	810
70—210mm F4—5·6	8—12	34°—12°	1:4	22	1.1	52	65 × 90	450
75—300mm F4—5·6	8—11	32.17°—8.24°	1:3.8	22	1.5	58	66 × 170	730

附表 1—2　　海鸥 135 照相机用摄影镜头

型　　号	G—E	θ	F_{mm}	S_{mm}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
24mm F2·8	7—8	84°	22	0.25	52	64 × 36	170
28mm F2·8	6—6	75°	22	0.30	49	64 × 39	200
50mm F1·4	6—7	46°	16	0.45	49	64 × 41	260
50mm F1·8	4—6	46°	22	0.45	49	64 × 45	170
135mm F2·8	5—5	18°	22	1.5	55	64 × 68	400
500mm F7·7	5—5	5°	7.7	1.7	27	72 × 93	284
18—28mm F4·0—4·5	11—14	100.5°—75°	22	0.5	72		490
28—70mm F3·5—4·5	8—9	75°—34°	22—29	0.4	52	64 × 72	390
28—80mm F3·5—4·8	8—9	75°—30°	22—30	0.45	55	64 × 80	450
28—105mm F2·8—3·8	10—15	75°—23°	22—32	1.5	72	70 × 92	461
35—135mm F3·5—4·5	12—15	64°—18°	22—32	0.78	55	64 × 102	590
70—210mm F4·0—5·6	7—11	34°—11.8°	22—32	1.1	52	64 × 92	490
75—300mm F4·5—5·6	8—11	32.2°—8.2°		1.5	58		730
80—200mm F4·5—7	8—11	30°—12°	22	1.5	49	64 × 100	390

ZEISS（该公司直接对中国出口之产品的商标为欧波同 Opton），民主德国卡尔·蔡司公司的商标为 CARL·ZEISS·JENA。

卡尔·蔡司光学公司历史悠久，产品质量在世界属一流水平，因而一些著名照相机和电影摄影机厂家纷纷订购该公司的摄影镜头，为本厂产品配套。例如，著名的瑞典哈苏（HASSE LBLAD）120 照相机、联邦德国产罗莱弗莱克斯（ROLLEIFLEX）120 照相机日本京磁电子公司生产的康太克斯（CONTAX）135 照相机，联邦德国阿里弗莱克斯（ARRIFLEX）电影摄影机，配备的摄影镜头均为联邦德国卡尔·蔡司公司生产的。

供 120 照相机使用的卡尔·蔡司摄影镜头的种类、技术性能参见附表 1—3 和附表 1—4 所示。

供 135 照相机使用的卡尔·蔡司摄影镜头的种类、技术性能参见附表 1—5 所示。

4. 德国罗敦司特（RODENSTOCK）摄影镜头

罗敦司特光学公司于 1877 年创立，至今已逾一百一十多年。目前已生产出六百多万个光学产品。该公司除生产大型照相机用摄影镜头外，还生产制版镜头、放大机镜头等。联邦德国林哈夫（LINHOF）牌、瑞士仙娜（SINAR）牌等大型专业照相机均配置罗敦司特摄影镜头。

附表 1—6 所示为罗敦司特摄影镜头的种类、技术性能及价格。

5. 德国施耐德（SCHNEIDER）摄影镜头

施耐德光学公司于 1913 年创立，至今已有七十多年历史。该公司主要生产大型照相机用摄影镜头及制版镜头和放大机镜头。德国林哈夫牌、瑞士仙娜牌大型专业照相机均配置施耐德摄影镜头。此外该公司还生产电视摄像镜头。

附表 1—7 所示为施耐德摄影镜头的种类和技术性能及价格。

附表 1—3　　卡尔·蔡司（CARL ZEISS）120 照相机用摄影镜头

（供 Hasselblad 照相机用，CF 镜头）

型　　号	E	θ	F	S_{min}	L	Q
30mm Distagon	9T*	180°	3.5—22	0.3	117.5	1365
40mm Distagon	11T*	88°	4—22	0.5	102	915
50mm Distagon	7T*	75°	4—22	0.5	98	795
60mm Distagon	7T*	66°	3.5—22	0.6	83	680
80mm Planar	7T*	52°	2.8—22	0.9	65	510
100mm Planar	5Y*	42°	3.5—22	0.9	75	605
105mm UV-Sonnar	7	40°	4.3—32	1.8	91	750
120mm Makro Plannar	6T*	37°	4—32	0.8	99	695
135mm Makra Plannar	7T*	32°	5.6—45		87	625
150mm Sonnar	5T*	28°	4—32	1.4	101	785
250mm Sonnar	4T*	17°	5.6—45	2.5	164	1000
250mm Sonnar Sa	6	17°	5.6—45	3	158	985
350mm Tele-Tessar	4T*	12.8	5.6—45	4.5	227	1350
500mm Tele-Apotessar	5T*	90°	8—64	8.5	329	1810
Mutar 2 ×	7T*				80	420

附表 1—4　　卡尔·蔡司(CARL ZEISS)120 照相机用摄影镜头(供 Rolleiflex 照相机用)

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	$\phi \times L$	Q	¥
F Distagon 1:3.5 30mm	7—8	180	22	0.3	108 × 115.5	1130	18
Distagon 1:4 40mm	9—10	88	32	0.5	104 × 125	1218	13.5
Distagon 1:4 50mm	7—7	75	32	0.5	79 × 93	555	31.6
Distagon 1:3.5 60mm	7—7	67	22	0.6	82.5 × 80.3	532	37
Planar 1:2.8 80mm	5—7	52	22	0.9	79 × 63	300	18
S Planar 1:5.6 120mm	4—6	36	45	0.95	79 × 91	435	35.5
Sonnar 1:4 150mm	3—5	29	32	1.4	79 × 94.5	545	31.9
Sonnar 1:5.6 250mm	3—4	18	45	2.5	79 × 143	665	37
Tele Tessar 1:5.6 350mm	4—4	13	45	5	90 × 227	1650	
Tele Tessar 1:5.6 500mm	5—6	9	45	8.5	100 × 308	1640	59

续附表 1—4

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	φ × L	Q	¥
Tele Tessar 1:8 500mm	3—5	9	64	8.5	100 × 316	1995	
Tele Tessar 1:8 1000mm	4—4	4.5	64	21	218 × 766	8740	180
Mirotar 1:5.6 1000mm	5—5	4.5	5.6	22	250 × 407	16500	570
Distagon 1:4 80mm	5—5	52	32	0.9	82 × 86	638	5.5
Sonnar 1:4 150mm	3—5	29	32	1.4	82 × 94	705	30
PCS Super Angulon 1:4.5 55mm Shift	8—10	85	32	0.5	104 × 155	1650	
PCS Rolleigon 1:4.5 75mm Shift	9—11	62	32		103 × 161		57
Variogon 1:4.5 75 ~ 150mm	13—15	55 ~ 29	32	1.8	100 × 180	1800	
Variogon 1:5.6 140 ~ 280mm	14—17	32 ~ 16	45	2.5 (S_w)	94 × 238	1750	
2 × 倍率镜							

附表 1—5　　卡尔·蔡司(CARL ZEISS)135 照相机用摄影镜头(供 Contax 照相机用)

型　　号	G—E	θ	F_{stop}	S_{min}	φ × L	Q	¥
F Distagon T* 16mm F2.8	7—8	180°	22	0.3	70 × 61.5	460	18
Distagon T* 15mm F3.5	12—13	110°	22	0.16	83.5 × 94	815	41.75
Distagon T* 18mm F4	9—10	100°	22	0.3	70 × 51.5	350	13.5
Distagon T* 25mm F2.6	7—8	80°	22	0.25	62.5 × 56	360	9.2
Distagon T* 28mm F2	8—9	74°	22	0.24	62.5 × 76	485	14.6
Distagon T* 28mm F2.8	7—7	74°	22	0.25	62.5 × 50	280	5.7
Distagon T* 35mm F1.4	8—9	62°30′	16	0.3	70 × 76	540	18.2
Distagon T* 35mm F2.8	6—6	62°	22	0.4	62.5 × 46	245	4.6
PC Distagon T* 35mm F2.8	9—9	83°	22	0.3	70 × 85.5	725	19.6
Tessar T* 45mm F2.8	3—4	50°	22	0.6	60 × 18	90	2
Planar T* 50mm F1.4	6—7	45°	16	0.45	62.5 × 41	275	4.5

续附表 1—5

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	$\phi \times L$	Q	¥
Planar T* 50mm F1.7	6—7	45°	16	0.6	61 × 36.5	190	3
S Planar T* 60mm F2.8 Macro	4—6	39°	22	0.24	75.5 × 74	570	17
Planar T* 85mm F1.4	5—6	28°30′	16	1	70 × 64	595	12.4
Sonnar T* 85mm F2.8	4—5	27°30′	22	1	62.5 × 47	255	8.2
Sonnar T* 85mm F2.8 *	4—5	27°30′	22	1	61 × 46.5	230	5.5
Planar T* 100mm F2	5—6	24°30′	22	1	70 × 84	670	14.1
Macro Planar T* 100mm F2.8	7—7	24°	22	0.4	76 × 86.5	740	23.3
Sonnar T* 100mm F3.5	4—5	24°	22	1	61 × 61	285	4.4
S Planar T* (Bellows)100mm F4	4—6	33	32	m = 1.4 ×	62.5 × 48.5	285	14.8
Planar T* 135mm F2	5—5	18°30′	22	1.5	75 × 101	830	16.35
Sonnar T* 135mm F2.8	4—5	18°30′	22	1.6	68.5 × 93	585	5.6
Sonnar T* 180mm F2.8	5—6	14°	22	1.4	78 × 131	815	17.55

续附表 1—5

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	$\phi \times L$	Q	¥
Tele Tessar T* 200mm F4	5—6	12°40′	32	1.5	66.5 × 122	550	11.5
Tele Tessar T* 300mm F4	5—5	8°15′	32	3.5	94 × 205	1720	19
Tele Apo Tessar T* 300mm F2.8	7—8	8°2′	22	3.5	120 × 244	2600	100
Mirotar 500mm F4.5	5—5	5°	4.5	3.5	151 × 225	4500	239
Mirotar 1000mm F5.6	5—5	2°30′	5.6	12	250 × 470	16500	517
N Mirotar 210mm(夜视镜头)		8°	1.4(主镜头) 0.03(总效果)	20	90 × 365	2170	308
Vario sonnar T* 40 ~ 80mm F3.5	9—13	55°—31°	22	1.2	67 × 87	605	21.6
Vario sonnar T* 70 ~ 210mm F3.5	12—15	33°—12°	22	1.8	77 × 186	1145	25
Mutar T* Ⅰ 2×(倍率镜)	5—6				64.5 × 37.5	240	5.8
Mutar T* Ⅱ 2×(倍率镜)	4—7				64.5 × 51	300	7.8

附表 1—6　罗敦司特（RODE NSTOCK）大型照相机用摄影镜头

（供 LINHOF、SINAR、HORSE MAN 等照相机用）

型　　号	f	G—E	F	1/11 时 d	1/11 时 θ	φ × L	DM
GRANDAGON N	65	4—8	4.5 ~ 45	167	104	70 × 68	1214.50
	75	同上	同上	192	104	70 × 78	1331.60
	75	同上	6.8 ~ 45	181	100	60 × 65	864.70
	90	同上	4.5 ~ 45	232	104	85 × 93	1536.50
	90	同上	6.8 ~ 45	213	100	70 × 78.5	952.40
	115	同上	6.8 ~ 45	281	102	85 × 93	1459.30
	155	同上	6.8 ~ 64	369	100	110 × 133.5	3226.70
	200	同上	6.8 ~ 64	475	100	140 × 172	1687.70
Sironar N	100	4—6	5.6 ~ 45	141	68	42 × 38	452.40
	120	同上	5.6 ~ 45	163	68	57 × 59	553.30
	135	同上	5.6 ~ 45	185	68	42 × 43.5	521.50
	150	同上	5.6 ~ 64	198	68	51 × 51	573.00
	180	同上	5.6 ~ 64	244	68	60 × 57	731.60
	210	同上	5.6 ~ 64	276	68	70 × 66	837.90
	240	同上	5.6 ~ 64	325	68	80 × 76.7	1318.90
	300	同上	5.6 ~ 61	393	68	90 × 94.5	1842.10

续附表 1—6

型　　号	f	G—E	F	f/11 时 d	f/11 时 θ	φ × l.	DM
Sironar-N	360	同上	6.8 ~ 64	415	6°	110 × 116.5	2043.10
	480	同上	8.4 ~ 64	420	48°	115 × 146.8	2788.80
Makro-Sironar N	210	4—6	5.6 ~ 64			70 × 68	1604.70
	300	同上	5.6 ~ 64			80 × 93	3232.40
Apo-Ronar	150	4—4	9 ~ 64	130	46°	42 × 35.5	606.80
	240	同上	9 ~ 64	204	46°	51 × 41.5	779.60
	300	同上	9 ~ 64	256	46°	51 × 47.5	917.90
	360	同上	9 ~ 64	308	46°	60 × 59.2	1269.00
	420	同上	9 ~ 64	312	40°	60 × 63.5	1427.70
	480	同上	9 ~ 64	382	44°	70 × 67	1564.30
	600	同上	9 ~ 64	476	43°	105 × 91	2865.10
	1000	同上	16 ~ 64			110 × 188	7382.30
	1200	同上	16 ~ 64			132 × 232	11552.10
Imagon	200	1—2					589.20
	250	同上					671.50
	300	同上					722.20

附表 1—7　施耐德（SCHNEIDER）大型照相机用摄影镜头

（供 LINHOF、SINAR、HORSEMAN 等照相机用）

型　号	f	G—E	F_{max}	全开光圈时 d	全开光圈时 θ	φ × L	HK S
SUPER-ANGU-LON	47	4—6	5.6	98	92°	51 × 54.7	4410
	65	同上	5.6	135	92°	70 × 72	5870
	75	同上	5.6	156	92°	70 × 78	6450
	90	同上	5.6	187	92°	85 × 93.5	7020
	90	同上	8	187	92°	70 × 74.5	4680
	120	同上	8	250	92°	85 × 96.1	7130
	165	同上	8	342	92°	115 × 135.5	16930
	210	同上	8	418	92°	132 × 179.7	26910
	250	同上	5.6				26910
SUPER-SYM-MAR HM	150	6—8	5.6	220	73°	80 × 101.2	8430
	210	同上	5.6	300	70°	105 × 122.1	13480
SYMMAR-S	100	4—6	5.6	118	60°	42 × 38.5	2800
	120	同上	5.6	142	60°	51 × 45	3220
	135	同上	5.6	156	60°	51 × 47.6	3060
	150	同上	5.6	174	60°	60 × 55	3170

续附表 1—7

型号	f	G—E	F_{max}	全开光圈时		$\phi \times L$	HK $
				d	0		
SYMMAR S	180	同上	5.6	208	60°	70 × 64	4100
	210	同上	5.6	242	60°	80 × 73	4490
	240	同上	5.6	278	60°	90 × 83.5	7550
	300	同上	5.6	339	60°	110 × 101.5	9890
	360	同上	5.6	405	60°	125 × 112	11520
	480	同上	8.4	370	43°	110 × 128.1	14700
	480	同上	9.4	370	43°	110 × 128.1	15160
TELE ARTON	250	5—5	5.6	154	34°	70 × 117	6560
XENAR	150	3—4	5.6	156	55°	36 × 35.5	1830
	210	同上	6.1	225	55°	48 × 49.7	2960
	300	同上	5.6	313	55°	70 × 68.2	5890
TELE XENAR	360	2—4	5.5	224	34°	70 × 110	6910
APO ARTAR	240	4—4	9	176	40	51 × 43	4910
	360	同上	9	259	40°	60 × 55.8	7510
	480	同上	11	351	40°	70 × 62.1	8660

6. 法国昂热尼厄（ANGÉNIEUX）摄影镜头

法国昂热尼厄公司由皮埃尔·昂热尼厄（Pierre Angénieux）先生创立，以生产电影摄影镜头为主，近来也生产出一些供135照相机使用的摄影镜头，以及电视摄像镜头。

昂热尼厄照相用摄影镜头的种类和技术性能见附表1—8所示。

附表1—8　　昂热尼厄（ANGÉNIEUX）135照相机用摄影镜头

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	$\phi \times L$	Q
DEM180 f2.3 APO	6—8	14°	22	1.8	91 × 138	995
DEM200 f2.8 ED	6—8	12°30′	22	2.15	91 × 143	945
Zoom 35—70 f2.5 ~ 3.3	11—11	63° ~ 35°	22	1 (f = 35) 0.46 (f = 50 ~ 70)	71 × 136	525
Zoom 70—210 f3.5	11—15	34° ~ 12°	22	0.86	71 × 175	780

7. 日本骑士(HORSEMAN,音译为霍斯曼)照相机用摄影镜头

驹村（KOMAMURA）摄影株式会社是生产大型专业照相机的生产厂家，主要生产骑士牌VH-R型、45HF型等大型专业照相机，为该照相机配套的摄影镜头为东京光学托普柯TOKYO KOGAKU TOPCOR）牌摄影镜头，主要包括普通像场和大像场（Large Format）两类。其具体种类和技术性能见附表1—9所示。

8. 日本玛米亚照相机用塞柯（SEKOR）摄影镜头

玛米亚(MAMIYA)米机股份有限公司除生产玛米亚照相机外,还生产为照相机配套的塞柯牌摄影镜头。其中为玛米亚RB67型6cm × 7cm照相机和M645型6cm × 4.5cm照相机配套的摄影镜头的种类、技术性能及价格,分别见附表1—10和附表1—11所示。

附表 1—9 东京光学托普柯（TOPCOR）大型照相机用摄影镜头

（供骑士 4″×5″照相机用）

型 号	G—E	全开光阑时		F_{min}	$\phi \times L$	Q
		d	θ			
S65mm F7	4—6	120	65°	45	42×55.8	280
P75mm F5.6	4—6	100	68°	32	42×37.9	210
S90mm F5.6	4—6	130	72°	45	42×39.5	210
P105mm F3.5	3—4	100	51°	32	42×38.2	240
S105mm F4.5	4—6	128	63°	32	65×64	410
S120mm F5.6	4—6	160	64°	45	42×49.8	270
S150mm F5.6	3—4	140	50°	45	42×41.5	230
180mm F5.6	4—4	100	32°	45	54×74.5	310
LF90mm F5.6	4—7	154	81°	64	80×84	600
LF150mm F5.6	4—6	174	60°	64	60×61	340
LF180mm F5.6	4—6	203	60°	64	60×62.5	340
LF210mm F5.6	4—6	243	60°	64	70×78	510
LF300mm F5.6	4—6	346	60°	64	100×84	1300

附表 1—10 塞柯（SEKOR）摄影镜头（供玛米亚 RB67 型照相机用）

型 号	G—E	θ	F_{min}	S_{max}	Y
37mm f/4.5	6—9	180°	32	0.257	14.85
50mm f/4.5	9—11	84°	32	0.28	10.7
65mm f/4	7—7	69°	32	0.32	10.86
90mm f/3.5	6—6	53°	32	0.43	9.55
110mm f/2.8	5—6	44°	32	0.53	9.8
127mm f/3.8	3—5	38°	32	0.66	8.95
Macro 140mm f/4.5	4—7	35°	37	0.75	9.9
180mm f/4.5	3—5	28°	45	1.11	9.5
250mm f/4.5	4—5	21°	45	1.85	10.5
360mm f/6	5—6	14°	45	3.69	12.9
500mm f/8	6—6	10°	32	6.6	23.36

附表 1—11　塞柯（SEKOR）摄影镜头（供玛米亚 M645 型照相机用）

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	Q	¥
4/24mm	8—10	180°	22	0.3	785	10.95
3.5/35mm	7—9	90°	22	0.45	445	6.73
2.8/45mm	7—9	76°	22	0.45	475	6.73
2.8/55mm	6—8	65°	22	0.45	335	5.43
2.8/70mm	4—6	53°	22	0.8	395	6.57
1.9/80mm	6—7	47°	22	0.7	420	5.3
2.8/80mm	5—6	47°	22	0.7	250	3.9
4/80mm	4—6	47°	22	0.375	585	7.56
2.8/110mm	5—5	35°	22	1.2	390	
4/145mm	5—7	27°	32	1.5	900	
3.5/150mm	5—5	26°	32	1.5	415	
4/210mm	4—5	19°	32	2.5	715	
5.6/300mm	5—6	13°	32	4	710	
5.6/500mm	5—6	8°	45	9	2280	
8/500mm	5—7	8°	8	4	880	
4.5/75 ~ 150mm	10—11	50° ~ 26°	32	1.8	970	
4.5/105 ~ 210mm	11—15	36° ~ 19°	32	2.5	1220	

9. 日本勃朗尼卡照相机用吉野（ZENZANON）摄影镜头

吉野·勃朗尼卡（ZENZA BRONICA）股份有限公司除生产勃朗尼卡 120 照相机外，还生产为照相机配套的吉野牌摄影镜头。附表 1—12、附表 1—13、附表 1—14 中所列分别为供勃朗尼卡牌 6×4.5 型、6×6 型、6×7 型 120 照相机配套之吉野摄影镜头的种类、技术性能和价格。1995 年吉野公司被日本腾龙公司收购。

附表 1—12　　吉野(ZENZANON)6×4.5 照相机摄影镜头

型　　号	G—E	θ	F	S_{max}	Φ_F	φ × L	Q
PE 30mm F3.5 FISHEYE	8—11	180°	3.5—22	0.27	32.5	96 × 84.5	900
PE 40mm F4	8—9	82.1°	4—22	0.35	62	82 × 50.5	510
PE 50mm F2.8	7—9	69.7°	2.8—22	0.46	62	82 × 50.5	490
PE 60mm F2.8	7—7	60.7°	2.8—22	0.42	62	82 × 54	520
PE 75mm F2.8	5—6	49.7°	2.8—22	0.6	62	82 × 49.5	440
PE 105mm F4 MACRO[1:1]	8—9	36.9°	4.5—32	0.35m	67	86 × 104	920
PE 135mm F4	4—6	29.1°	4—32	1.0	62	82 × 91.5	750
PE 150mm F3.5	5—6	26.1°	3.5—22	1.5	62	82 × 71	635
PE 180mm F4.5	8—9	21.9°	4.5—32	1.0	62	82 × 107.5	840
PE 200mm F4.5	5—6	20.2°	4.5—32	2.0	62	82 × 109	775
PE 250mm F5.6	6—6	16.2°	5.6—45	3.0	62	82 × 147	910
PE 500mm F8	10—11	8.1°	8—64	8.0	122	139 × 318	3,760
PE 500mm F8	6—7	8°	8—45	8.5	95	102 × 267	1,890
PE 45 – 90mm F4 – 5.6 ASPHERICAL	10—11	76.6°—43.4°	4—32	0.5	95	102.5 × 108.5	1,015
PE 100 – 220mm F4.8 ASPHERICAL[IF]	13—16	38°—16°	4.8—32	1.0	95	106.5 × 180.5	2,175
TELE CONVERTER PE2X	6—7				—	83 × 53	460
TELE CONVERTER PE1.4X	5—5				—	83 × 28	300

附表 1—13　　吉野(ZENZANON)6×6 照相机摄影镜头

型　　号	G—E	θ	F	S_{min}	Φ_r	φ × L	Q
PS 35mm F3.5 FISHEYE	8—11	180°	3.5—22	0.28	32.5	98 × 91	960
PS 40mm F4	8—11	87°	4—22	0.4	95	98 × 67.5	650
PS 50mm F3.5	8—10	76°	3.5—22	0.5	77	82 × 61.7	590
PS 65mm F4	7—9	62.3°	4—22	0.6	67	82 × 69.6	665
PS 80mm F2.8	5—6	50.7°	2.8—22	0.8	67	82 × 52	490
PS 110mm F4.5 MACRO 1:1	8—9	39.8°	4.5—32	0.37	72	86 × 107	940
PS 135mm F4	4—6	32.8°	4—32	1.0	67	83 × 79	755
PS 150mm F4	4—6	29.5°	4.5—32	1.0	67	83 × 96	865
PS 180mm F4.5	8—9	24.7°	4.5—32	1.0	67	83 × 96	865
PS 200mm F4.5	5—7	22.8°	4.5—32	2.5	67	83 × 107	870
PS 250mm F5.6	5—7	18.2°	5.6—45	3.0	67	83 × 150.2	1,010
PS 500mm F8	10—11	9.2°	8—64	8.0	122	139 × 307.5	3,760
S 500mm F8	6—7	9°	8—45	8.5	95	102 × 255	1890
TELE CONVERTER PS 2X	6—7				—	84 × 64.4	600
TELE CONVERTER PS 1.4X	5—5				—	84 × 29	370

附表 1—14　　吉野(ZENZANON)6×7 照相机摄影镜头

型　　号	G—E	θ	F	S_{mm}	Φ_f	$\phi \times l.$	Q
PG 50mm F4.5	8—11	83°	4.5—22	0.5	95	98 × 74	790
PG 65mm F4	7—9	68.5°	4—22	0.6	72	87 × 71	715
PG 80mm F3.5	6—8	58.6°	3.5 - 22	0.55	72	87 × 71.5	755
PG 100mm F3.5	4—6	48°	3.5—22	0.75	72	87 × 67.5	630
PG 110mm F4 MACRO	4—6	44.5°	4—32	0.66	72	87 × 78.5	725
PG 150mm F4	5—5	33°	4—22	1.5	72	87 × 62	650
PG 200mm F4.5	5—6	25.5°	4.5—32	2.0	82	87 × 97.5	970
PG 250mm F5.6	5—6	20.5°	5.6—32	3.0	82	87 × 142	1,200
PG 500mm F8	10—11	10.3°	8—64	8.0	122	139 × 307.5	3,760
TELE CONVERTER G2X	6—7					88 × 67	680
TELE CONVERTER G1.4X	5—5					88 × 32.5	420

10. 德国莱卡照相机用莱兹（LEITZ）摄影镜头

莱兹公司以1925年投放市场的莱卡（LEICA）135照相机而闻名于世界。该公司目前除生产莱卡M型和R型系列的135照相机外，还生产一系列高质量的135照相机用莱兹摄影镜头、及生产望远镜、幻灯机、放大机等设备。

135照相机用莱兹摄影镜头的种类、技术性能和价格，参见附表1—15和附表1—16。其中R型摄影镜头供莱卡R4型、R5型等单镜头反光照相机配套，M型摄影镜头为莱卡M5型、M6型旁轴平视光学取景的照相机配套。

11. 日本尼康照相机用尼柯（NIKKOR）摄影镜头

日本尼康（NIKON）股份有限公司（即日本光学工业股份有限公司）创建于1917年，系由日本三菱财团（MITSUBISHI）分出的，主要为日本国防部生产军用光学仪器，同时生产照相机和摄影镜头。

尼康公司创建初期曾高薪聘请了若干名德国光学技师，并于1923年生产出尼柯摄影镜头。该公司早期生产的照相机是从仿制德国康太克斯（Contax）照相机开始的。

NIKON系由日本中“日本、光学”两词的罗马字拼写词头组成。

供135单镜头反光照相机用尼柯摄影镜头的种类、技术性能与价格，参见附表1—17和附表1—18中所示。

12. 日本佳能照相机用佳能（CANON）摄影镜头

日本卡侬股份有限公司于1933年创建（早期称为精机光学研究所），在1935年生产出了Hansa Canon牌照相机，该照相机系德国莱卡照相机的仿制品（该相机采用尼康公司的镜头）。

附表 1—15　　莱兹(LEITZ)R 型摄影镜头(135 单反相机用)

型　　号	θ	E/G	F_{min}	S_{min}	L × ϕ	Q	Y
SUPER-ELMAR-R 15mm f/3.5	110°	13/12	22	0.16	92.5 × 83.5	815	44.5
Fisheye-ELMARIT-R 16mm f/2.8	180°	11/8	16	0.30	60 × 71	470	23
ELMARIT-R 19mm f/2.8	95.7°	9/7	16	0.30	60 × 88	500	24
SUPER-ANGULON-R/21mm f/4	92°	10/8	22	0.20	43.5 × 78	410	22.5
ELMARIT-R 24mm f/2.8	84°	9/7	22	0.30	48.5 × 67	420	19.5
ELMARIT-R 28mm f/2.8	76°	8/8	22	0.30	40 × 63	275	15.5
SUMMICRON-R 35mm f/2	64°	6/6	16	0.30	54 × 66	422	16
ELMARIT-R 35mm f/2.8	64°	7/6	22	0.30	41.5 × 66	305	8.4
PA-CURTAGON-R 35mm f/4	64/78°	7/6	22	0.30	51 × 70	290	21.5
SUMMILUX-R 50mm f/1.4	45°	7/6	16	0.50	50.6 × 66.5	395	19.8
SUMMICRON-R 50mm f/2	45°	6/4	16	0.50	41 × 66	250	6.6
MACRO-ELMARIT-R 60mm f/2.8	39°	6/5	22	0.27	62.3 × 67.5	390	17.5
SUMMILUX-R 80mm f/1.4	30°	7/5	16	0.80	69 × 75	625	24
SUMMICRON-R 90mm f/2	27°	5/4	16	0.70	62.5 × 70	560	16
ELMARIT-R 90mm f/2.8	27°	4/4	22	0.70	57 × 63	475	10
MACRO-ELMAR-R 100mm f/4	25°	4/3	22	0.60	90 × 67.5	540	15.8

续附表 1—15

型　　号	θ	E/G	F_{min}	S_{min}	L × ϕ	Q	Y
MACRO-ELMAR 100mm f/4	25°	4/3	22	供皮腔用	62.5 × 68	365	12
ELMARIT-R 135mm f/2.8	18°	5/4	22	1.50	93 × 67	730	211
ELMARIT-R 180mm f/2.8	14°	5/4	22	1.80	121 × 75	825	26.5
APO-TELYT-R 180mm f/3.4	14°	7/4	22	2.50	135 × 68	750	28.5
ELMAR-R 180mm f/4	14°	5/4	22	1.80	100 × 65.5	540	18
TELYT-R 250mm f/4	10°	7/6	22	1.70	195 × 75	1230	32.5
APO-TELYT-R 280mm f/2.8	8.5°	8/7	22	2.50	261 × 125	2750	62
TELYT-R 350mm f/4.8	7°	7/5	22	3.00	286 × 83.5	1820	38.5
TELYT-R 400mm f/6.8	6°	2/1	32	3.60	384 × 78	1830	30.2
MR-TELYT-R 500mm f/8	5°	5/5	8	4.00	121 × 87	750	24.5
TELYT-R 560mm f/6.8	4.3°	2/1	32	6.40	530 × 98	2330	38.7
TELYT-S 800mm f/6.3	3°	3/1	32	12.50	790 × 152	6860	定做
VARIO-ELMAR-R 35-70mm f/3.	64—35°	8/7	22	1.00	64.5 × 72	420	17.5
VARIO-ELMAR-R 75-200mm f/4.5	32—12.5°	15/11	22	1.20	157 × 70	725	
VARIO-ELMAR-R 70-210mm f/4	35°—12°	12/19	22	1.10	157 × 73.5	720	26.5
R2 × 倍率镜		5/4			30 × 62	180	12.5

附表 1—16　　莱兹(LEITZ)M 型摄影镜头(供莱卡 M5 照相机用)

型　　号	θ	E/G	F_{min}	S_{min}	L × ϕ	Q	¥
ELMARIT-M 21mm f/2.8	92°	8/6	16	0.7	46.5 × 62	290	18
ELMARIT-M 28mm f/2.8	76°	8/6	22	0.7	48 × 53	250	15.8
SUMMILUX-M 35mm f/1.4	64°	7/5	16	1.0	28 × 53	245	11
SUMMICRON-M 35mm f/2	64°	7/5	16	0.7	26 × 52	190	14
NOCTILUX-M 50mm f/1	45°	7/6	16	1.0	62 × 69	580	25.5
SUMMILUX-M 50mm f/1.4	45°	7/5	16	1.0	46 × 53	360	18
SUMMICRON-M 50mm f/2	45°	6/4	16	0.7	42 × 52	195	7.9
SUMMILUX-M 75mm f/1.4	31°	7/5	16	1.0	80 × 68	625	24.5
SUMMICRON-M 90mm f/2	27°	5/4	16	1.0	77 × 62.5	460	13.8
TELE-ELMARIT-M 90mm f/2.8	27°	4/4	16	1.0	62 × 51.5	225	9.7
ELMARIT-M 135mm f/2.8	18°	5/4	32	1.5	114 × 66	735	16

附表 1—17　　尼柯(NIKKOR)自动调焦(AF)摄影镜头(尼康 135 单反照相机用)

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{max}	Φ_f	$\phi \times L$	Q
AF20-35mm f/2.8D IF	11/14	94°—62°	22	0.5(1.7)	77	82 × 94	585
AF24-50mm f/3.3-4.5D	9/9	84°—46°	22	0.6(2)[0.5(1.6)]	62	67.5 × 74.1	365
AF24-120mm f/3.5-5.6D IF	11/15	84°—20°30′	22	0.5(2)	72	79 × 80	555
AF28-70mm f/3.5-4.5D	7/8	74°—34°20′	22	0.5(2)[0.39(1.3)]	52	67.5 × 71	355
AF-S28-70mm f/2.8D IF-ED	11/15	74°—34°20′	22	0.7	77	82.5 × 124.5	935
AF28-80mm f/3.5-5.6D	7/7	74°—30°10′	22	0.5(1.7)	58	66 × 69	220
AF28-85mm f/3.5-4.5	11/15	74°—28°30′	22	0.8(3)_0.23(0.8)_	62	71 × 89.5	540
AF35-70mm f/2.8D	12/15	62°—34°20′	22	0.6(2)_0.28(0.9)_	62	71.5 × 94.5	675
AF35-80mm f/4-5.6D	7/8	62°—30°10′	22	0.35(1.2)	52	66 × 67.5	180
AF35-105mm f/3.5-4.5D IF	10/13	62°—23°20′	22	0.85(3)	52	68.5 × 72.5	410
AF35-135mm f/3.5-4.5	12/15	62°—18°	22	1.5(5)_0.3(1)_	62	72.5 × 109	685
AF70-210mm f/4-5.6D	9/12	34°20′—11°50′	32	1.5(5)_1.2(3.9)_	62	73.5 × 108	600
AF75-300mm f/4.5-5.6	11/13	31°40′—8°10′	32	3(10)_1.5(5)_	62	72 × 166	850
AF80-200mm f/2.8D ED	11/16	30°10′—12°20′	22	1.8(6)_1.5(4.9)_	77	87 × 186.5	1300

续附表 1—17

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
AF80-200mm f/4.5-5.6D	8/10	30°10′—12°20′	32	1.5(5)	52	72 × 87.5	330
AF-S 80-200F f/2.8D IF-ED	14/18	30°10′—12°20′	22	1.5	77	88.5 × 207	1 550
AF 鱼眼 16mm f/2.8D*2	5/8	180°	22	0.25(0.85)	提供	63 × 57	285
AF18mm f/2.8D	10/13	100°	22	0.25(0.85)	77	82 × 58	385
AF20mm f/2.8D*2	9/12	94°	22	0.25(0.85)	62	69 × 42.5	270
AF24mm f/2.8D*2	9/9	84°	22	0.3(1)	52	64.5 × 46	270
AF28mm f/1.4D*2	8/11	74°	16	0.35(1.15)	72	75 × 77.5	520
AF28mm f/2.8D	6/6	74°	22	0.25(0.85)	52	65 × 44.5	195
AF35mm f/2D	5/6	62°	22	0.25(0.85)	52	64.5 × 43.5	205
AF50mm f/1.4D	6/7	46°	16	0.45(1.5)	52	64.5 × 42.5	225
AF50mm f/1.8	5/6	46°	22	0.45(1.5)	52	63 × 39	155
AF85mm f/1.4D IF	8/9	28°30′	16	0.85(3)	77	80 × 72.5	560
AF85mm f/1.8D	6/6	28°30′	16	0.85(3)	62	71.5 × 58.5	375

续附表 1—17

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{min}	Φ_t	$\phi \times L$	Q
AF180mm f/2.8D IF-ED	6/8	13°40′	22	1.5(5)	72	78.5 × 144	770
AF300mm f/2.8D IF-ED	6/8	8°10′	22	3(10)	39	133 × 255	2700
AF-S 300mm f/2.8D IF-ED	8/11	8°10′	22	2.5(10)	52	124 × 269	3000
AF300mm f/4 IF-ED	6/8	8°10′	32	2.5(8.5)	82/39[*5]	89 × 219	1330
AF-1 400mm f/2.8D IF-ED	7/10	6°10′	22	3.3(12)	52	158 × 376	6300
AF-S 500mm f/4D IF-ED	9/11	5°	22	5(20)	52	140 × 394	3700
AF-S 600mm f/4D IF-ED	7/10	4°10′	22	6(20)	52	166 × 445	5800
AF 微距 60mm f/2.8D	7/8	39°40′	32	0.219(8 3/4in)	62	70 × 74.5	455
AF 微距 105mm f/2.8D	8/9	23°20′	32	0.314(1)	52	75 × 104.5	555
AF 微距 200mm f/4D IF-ED	8/13	12°20′	32	0.5(1 5/8)	62	76 × 193	1200
AF DC 105mm f/2D	6/6	23°20′	16	0.9(3)	72	79 × 111	620
AF DC 135mm f/2D	6/7	18°	16	1.1(4)	72	79 × 120	810
TC-14E	5/5	-	-	-	-	66 × 24.5	200
TC-20E	6/7	-	-	-	-	66 × 55	340

附表 1—18　　尼柯(NIKKOR)手控摄影镜头(尼康 135 单反照相机用)

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{min}	Φ_t	$\phi \times L$	Q
6mm f/2.8	9/12	220°	22	0.25(0.9)	内置式	236 × 160	5200
8mm f/2.8	8/10	180°	22	0.3(1)	内置式	123 × 128	1100
16mm f/2.8	5/8	180°	22	0.3(1)	提供	63 × 55.5	335
13mm f/5.6	12/16	118°	22	0.3(1)	提供	115 × 88.5	1200
15mm f/3.5	11/14	110°	22	0.3(1)	提供	90 × 83.5	630
18mm f/3.5	10/11	100°	22	0.25(0.85)	72	75 × 61.5	350
20mm f/2.8	9/12	94°	22	0.25(0.85)	62	65 × 42.5	260
24mm f/2	10/11	84°	22	0.3(1)	52	63 × 51.5	300
24mm f/2.8	9/9	84°	22	0.3(1)	52	63 × 46	275
28mm f/2	8/9	74°	22	0.25(0.9)	52	63 × 58.5	345
28mm f/2.8	8/8	74°	22	0.2(0.7)	52	63 × 44.5	250
35mm f/1.4	7/9	62°	16	0.3(1)	52	67.5 × 62	400

续附表 1—18

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
35mm f/2	6/8	62°	22	0.3(1)	52	63 × 51.5	280
50mm f/1.2	6/7	46°	16	0.5(1.7)	52	68.5 × 47.5	360
50mm f/1.4	6/7	46°	16	0.45(1.5)	52	63 × 40	250
50mm f/1.8	5/6	46°	22	0.6(2)	52	63 × 27.5	145
85mm f/1.4	5/7	28°30′	16	0.85(3)	72	80.5 × 64.5	620
105mm f/1.8	5/5	23°20′	22	1(3.5)	62	78.5 × 80.5	580
105mm f/2.5	4/5	23°20′	22	1(3.5)	52	64 × 69.5	435
135mm f/2	4/6	18°	22	1.3(4.5)	72	80.5 × 93.5	860
135mm f/2.8	4/5	18°	32	1.3(4.5)	52	64 × 83.5	435
180mm f/2.8 ED	5/5	13°40′	32	1.8(6)	72	78.5 × 130	800
200mm f/2 IF-ED	8/10	12°20′	22	2.5(9)	胶质滤光镜	132 × 225.5	2550
300mm f/2.8 IF-ED	6/8	8°10′	22	3(10)	39	132 × 255	2400

续附表 1—18

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{max}	Φ_F	φ × L	Q
300mm f/4.5 IF-ED	6/7	8°10′	32	2.5(10)	72	80 × 192	1060
400mm f/2.8 IF-ED	6/8	6°10′	22	4(15)	52	163 × 378.5	5150
400mm f/3.5 IF-ED	6/8	6°10′	22	4.5(15)	122/39*6	134 × 296	2800
400mm f/5.8 IF-ED	6/7	6°10′	32	4(15)	72	85 × 254	1200
500mm f/4 P IF-ED	6/8	5°	22	5(20)	39	138 × 384	3000
600mm f/4 IF-ED	6/8	4°10′	32	6.5(25)	39	173 × 465.5	5650
600mm f/5.6 IF-ED	6/7	4°10′	32	5(20)	39	132 × 387.5	2800
800mm f/5.6 IF-ED	6/8	3°	32	8(30)	52	163 × 546	5450
500mm f/8*2	6/6	5°	—	1.5(5)	82/39*6	89 × 109	840
1000mm f/11*2	5/5	2°30′	—	8(25)	39	119 × 233.5	1900
2000mm f/11*3	5/5	1°10′	—	18(60)	内置式	262 × 593.5	17500
28-85mm f/3.5-4.5	11/15	74°—28°30′	22	0.23(0.8)	62	67 × 89	510

续附表 1—18

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{min}	Φ_t	$\phi \times L$	Q
35-70mm f/3.3-4.5	7/8	62°—34°20′	22	0.5(2) [0.35(1)]	52	63 × 61	250
35-105mm f/3.5-4.5	12/16	62°—23°20′	22	1.4(5) [0.27(0.9)]	52	64 × 86.5	510
35-135mm f/3.5-4.5	14/15	62°—18°	22	1.5(5) [0.4(1.4)]	62	68 × 104	600
35-200mm f/3.5-4.5	13/17	62°—12°20′	22	1.6(5.5) [0.3(1)]	62	70 × 119	740
70-210mm f/4.5-5.6	8/11	34°20′—11°50′	32	1.5(5)	52	64 × 104	375
80-200mm f/4	9/13	30°10′—12°20′	32	1.2(4)	62	73 × 154	810
50-300mm f/4.5ED	11/15	46°—8°10′	32	2.5(8.5)	95	98 × 239	1950
100-300mm f/5.6	10/14	24°20′—8°10′	32	2(7) [0.71(2.3)]	62	74 × 199	930
180-600mm f/8 ED	11/18	13°40′—4°10′	32	2.5(8.5)	95	105 × 394	3600

续附表 1—18

型　　号	G/E	θ	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
1200-1700mm f/5.6-8 p IF-ED*2, *3	13/18	2°-1°30′	22	10(35)	52	237 × 880	16000
PC 28mm f/3.5	8/9	74°	22	0.3(1)	72	78 × 64.5	380
PC 35mm f/2.8	7/7	62°	32	0.3(1)	52	62 × 61.5	320
Noct 58mm f/1.2	6/7	40°50′	16	0.5(1.7)	52	74 × 51.5	465
微距 55mm f/2.8	5/6	43°	32	0.25(0.9)	52	63.5 × 62	290
微距 105mm f/2.8	9/10	23°20′	32	0.41(1.34)	52	66.5 × 83.5	515
微距 200mm f/4 IF	6/9	12°20′	32	0.71(2.34)	52	66 × 172	800
医疗 120mm f/4 IF	6/9	18°50′(1/11 ×)	32	0.35(1.1)	49	98 × 142	890
UV 105mm f/4.5	6/6	23°20′	32	0.48(1.57)	52	68.5 × 108	515

目前卡依公司除生产照相机和摄影镜头外，还生产复印机、8毫米电影摄影机等一系列产品。

卡依（Canon）的名称是由日文“观音”（即观世音菩萨的简称）的罗马字拼写 Kanon 演变而来。近年来推销员为追求吉利，在我国内地将 Canon 音译为“佳能”，在香港将 Canon 音译为锦囊。

为佳能 135 单镜头反光照相机配套之佳能摄影镜头的种类、技术性能和价格，参见表 1—19 中所示。

13. 日本旭·潘太克斯照相机用潘太克斯（PENTAX）摄影镜头

日本旭（ASAHI）光学工业股份有限公司于 1921 年创建（早期称为旭光学合资公司）。旭光学公司早期生产照相机是从仿制西德莱卡照相机开始，尔后逐步进入独立设计的。日本生产的第一台单镜头反光照相机，就是由旭光学公司于 1952 年制造的。日本米诺尔它（MINOLTA）照相机股份有限公司和日本小西六摄影股份有限公司，在早期生产米诺尔它和柯尼卡（KONICA）照相机时，均采用旭光学公司的摄影镜头。

潘太克斯（PENTAX）的名称是由英文五棱镜（PENTAPRISM）演变而来，而 ASAHI 是旭的日本发音。在香港，潘太克斯被音译为宾得。

潘太克斯为 135、6×4.5、6×7 单镜头反光照相机配套之摄影镜头的种类、技术性能和价格，参见附表 1—20、1—21、1—22 中所示。

14. 日本美能达照相机用美能达（MINOLTA）摄影镜头

日本米诺尔它在内地照相机股份有限公司于 1928 年创建（早期称为日德相机商店）。该公司于 1929 年仿制德国照相机，生产出 NIFCALETTE120 折合式照相机。

米诺尔它公司除生产照相机、摄影镜头外，还生产曝光表、电视摄像机。

附表 1—19　　佳能 135 照相机用自动调焦(AF)摄影镜头

型　　号	C—F	θ	m_{max}	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
EF15mm FishEye	7—8	180°	0.14	22	0.2	内置	73 × 62.2	330
EF14mm F2.8L USM	10—14	114°	0.1	22	0.25	内置	77 × 89	560
EF20mm F2.8 USM	9—11	94°	0.14	22	0.25	72	77.5 × 70.6	405
EF24mm F1.4L USM	9—11	84°	0.16	22	0.25	77	83.5 × 77.4	550
EF24mm F2.8	10—10	84°	0.16	22	0.25	58	67.5 × 48.5	270
EF28mm F1.8 USM	9—10	75°	0.18	22	0.25	58	73.6 × 55.6	310
EF28mm F2.8	5—5	75°	0.13	22	0.3	52	67.4 × 42.5	185
EF35mm F2	5—7	63°	0.23	22	0.25	52	67.4 × 42.5	210
EF50mm F1.0L USM	9—11	46°	0.11	16	0.6	72	91.5 × 81.5	985
EF50mm F1.4 USM	6—7	46°	0.15	22	0.45	58	73.8 × 50.5	290
EF50mm F1.8 Ⅱ	5—6	46°	0.15	22	0.45	52	68.2 × 41	130
EF50mm F2.5L Compact Macro	8—9	46°	0.5	32	0.23	52	67.6 × 63	280
EF85mm F1.2L USM	7—8	28°30′	0.11	16	0.95	72	91.5 × 84	1025

续附表 1—19

型　　号	G—E	θ	m_{max}	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
EF85mm F1.8 USM	7—9	28°30′	0.13	22	0.85	58	75 × 71.5	425
EF100mm F2 USM	6—8	24°	0.14	22	0.9	58	75 × 73.5	460
EF100mm F2.8 Macro	9—10	24°	1	32	0.31	52	75 × 105.3	650
EF135mm F2L USM	8—10	18°	0.17	32	0.9	72	82.5 × 112	750
EF135mm F2.8 Soft Focus	6—7	18°	0.12	32	1.3	52	69.2 × 98.4	390
EF180mm F3.5L Macro USM	12—14	13°40′	1	32	0.48	72	82.5 × 186.6	1090
EF200mm F1.8L USM	10—12	12°	0.09	22	2.5		103 × 208	3000
EF200mm F2.8L Ⅱ USM	7—9	12°	0.16	32	1.5	72	83.2 × 136.2	765
EF300mm F2.8L USM	8—10	8°15′	0.11	32	3		125 × 253	2855
EF300mm F4L IS USM	11—15	8°15′	0.24	32	1.5	77	90 × 221	1190
EF300mm F4L USM	7—8	8°15′	0.13	32	2.5	77	90 × 213.5	1160
EF400mm F2.8L Ⅱ USM	9—11	6°10′	0.11	32	4		167 × 348	5910
EF400mm F5.6L USM	6—7	6°10′	0.12	32	3.5	77	90 × 256.5	1250

续附表 1—19

型　　号	G—E	θ	m_{max}	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
EF500mm F4.5L USM	7—8	5°	0.11	32	5		130 × 390	3000
EF600mm F4L USM	8—9	4°10′	0.11	32	6		167 × 456	6000
EF1200mm F5.6L USM	10—13	2°05′	0.09	32	14		228 × 836	16500
EF17-35mm F2.8L USM	10—15	104°—63°	0.11	22	0.42	77	83.5 × 95.7	545
EF20-35mm F3.5-4.5 USM	11—12	94°—63°	0.13	22—27	0.34	77	83.5 × 68.9	340
EF22-55mm F4.5-5.6 USM	9—9	90°—43°	0.2	22—32	0.35	58	66 × 59.4	175
EF24-85mm F3.5-4.5 USM	12—15	84°—28°30′	0.16	22—32	0.5	67	73 × 69.5	380
EF28-70mm F2.8L USM	11—16	75°—34°	0.18	22	0.5	77	83.2 × 117.6	880
EF28-80mm F3.5-6.5 Ⅳ USM	10—10	75°—30°	0.26	22—38	0.35	58	66.4 × 71.2	200
EF28-105mm F3.5-4.5 USM	12—15	75°—23°30′	0.19	22—27	0.5	58	72 × 75	375
EF28-135mm F3.5-5.6 IS USM	12—16	75°—18°	0.19	22-36	0.5	72	78.4 × 96.8	540
EF35-80mm F4-5.6 USM	8—8	63°—30°	0.25	22—32	0.38	52	65 × 61	170
EF35-350mm F3.5-5.6L USM	15—21	63°—7°	0.25	22—32	0.6	72	85 × 167.4	1385

续附表 1—19

型　　号	G—E	θ	m_{max}	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
EF55-200mm F4.5-5.6 USM	13—13	43°—12°	0.21	22—27	1.2	52	70.4 × 97.3	310
EF70-200mm F2.8L USM	15—18	34°—12°	0.16	32	1.5	77	84.6 × 193.6	1310
EF75-300mm F4.5-5.6 IS USM	10—15	32°11′—8°15′	0.26	32—45	1.5	58	78.5 × 138.2	650
EF75-300mm F4-5.6 Ⅱ USM	9—13	32°11′—8°15′	0.25	32—45	1.5	58	71 × 122.1	480
EF80-200mm F4.5-5.6 USM	7—10	30°—12°	0.16	22—27	1.5	52	69 × 78.5	260
EF100-300mm F4.5-5.6 USM	10—13	24°—8°15′	0.2	32—38	1.5	58	73 × 121.5	540
EF100-300mm F5.6L	10—15	24°—8°15′	0.26	32	1.5	58	75 × 166.6	695
TS-E24mm F3.5L	9—11	84°	0.14	22	0.3	72	78 × 86.7	570
TS-E45mm F2.8	9—10	51°	0.16	22	0.4	72	81 × 90.1	645
TS-E90mm F2.8	5—6	27°	0.29	32	0.5	58	73.6 × 88	565
EF1.4X 增焦距镜	4—5						67.6 × 27.3	200
EF2X 增焦距镜	5—7						67.6 × 50.5	240

附表 1—20　　潘太克斯(PENTAX)自动调焦(AF)摄影镜头(135 单反照相机用)

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	m_{max}	Φ_z	$\phi \times L$	Q
FA 20mm f/2.8	9—11	94.0	22	0.25	0.12	67	70.0X44.0	255
FA * 24mm f/2.0AL[IF]	9—11	84.0	22	0.30	0.13	67	72.5 × 65.5	405
FA 28mm f/2.8AL	5—5	75.0	22	0.30	0.13	49	65.0 × 40.5	185
FA 35mm f/2 AL	5—6	63.0	22	0.30	0.17	49	64.5 × 44.5	195
FA 50mm f/1.4	6—7	47.0	22	0.45	0.15	49	65.0 × 37.0	220
FA 50mm f/1.7	5—6	47.0	22	0.45	0.15	49	65.0 × 37.0	170
FA * 85mm f/1.4 [IF]	7—8	28.5	22	0.85	0.11	67	79.0 × 70.0	550
FA 135mm f/2.8 [IF] +	7—8	18.0	32	0.70	0.25	52	68.0 × 80.0	375
FA * 200mm f/2.8 ED[IF]	8—9	12.5	32.	1.20	0.17	77	83.0 × 134.0	785
FA * 300mm f/2.8 ED[IF]	7—10	8.2	32	2.00	0.17	43 (112)	123.0 × 247.0	2,500
FA * 300mm f/4.5 ED[IF]	7—9	8.2	32	2.00	0.17	67	72.5 × 160.0	935
FA * 400mm f/5.6 ED[IF]	8—9	6.2	45	2.00	0.23	77	83 0 × 199.0	1,140
FA * 600mm f/4.0 ED[IF] +	7—9	4.1	32	5.00	0.13	43 (150)	176.0 × 456.5	7,000

续附表 1—20

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	m_{max}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
F 鱼眼 17-28mm f/3.5-f/4.5	7—9	180.0—90.0	22—32	0.45	0.07	—	65.0×61.0	255
FA 20-35mm f/4.0 AL	8—10	94.0—63.0	22	0.30	0.16	58	69.5×68.0	245
FA * 20-70mm f/2.8 AL	11—14	75.0—34.5	22	0.43	0.25	67	84.5×104.0	800
FA 28-70mm f/4.0 AL	7—9	75.0—34.5	22	0.40	0.23	52	65.5×66.0	240
FA 28-80mm f/3.5-f/5.6	8—8	75.0—30.5	22—38	0.50	0.19	58	66.5×78.0	275
FA 28-105mm f/4.0-f/5.6[IF]	12—15	75.0—23.5	22—32	0.50	0.18	62	72.0×74.0	305
FA 28-105mm f/4.0-f/5.6	11—13	75.0—23.5	22—32	0.43	0.32	58	72.5×95.5	515
FA 28-200mm f/3.8-f/5.6 AL[IF]	14—16	75.0—12.5	22—32	0.52*	0.21*	72	78.0×83.0	465
FA 35-80mm f/4.0-f/5.6	6—7	63.0—30.5	22	0.40	0.25	49	66.5×58.0	160
F 35-80mm f/4.0-f/5.6	6—7	63.0—30.5	22—32	0.40	0.25	49	65.0×58.0	185
FA 70-200mm f/4.0-f/5.6	8—10	34.5—12.5	32—45	1.10	0.25	49	73.0×116.5	465
FA * 80-200mm f/2.8 ED[IF]	13—16	30.5—12.5	32	1.40	0.19	77	87.5×191.5	1,570
FA 80-200mm f/4.7-f/5.6	7—11	30.5—12.5	32—38	1.10	0.25	49	65.0×99.5	270

续附表 1—20

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	m^{max}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
F 80-200mm f/4.7-f/5.6	7—11	30.5—12.5	32—38	1.10	0.25	49	65.0×99.5	295
FA 80-320mm f/4.5-f/5.6	10—13	30.5—7.7	32—38	1.50	0.28	58	74.5×129.0	550
F 100-300mm f/4.5-f/5.6	8—12	24.5—8.2	32—38	1.50	0.25	58	71.5×154.5	605
FA * 250-600mm f/5.6ED[IF] +	16—18	9.9—4.1	32	3.50	0.20	43 (112)	134.0×442.0	5,600
FA 微距 50mm f/2.8	7—8	47.0	32	0.195	1.00	52	68.0×70.0	385
FA 微距 100mm f/2.8	8—9	24.5	32	0.306	1.00	58	74.0×103.5	600
FA 微距 100mm f/3.5	4—5	24.5	22	0.43	0.50	49	68.0×71.5	220
FA 柔焦 28mm f/2.8	5—5	75.0	22	0.25	0.18	49	65.5×40.5	195
FA 柔焦 85mm f/2.8	4—5	28.5	32	0.50	0.25	52	66.0×60.0	305
F AF 增距 1.7X	4—6	—	—	—	—	—	64.0×26.0	135

附表 1—21　　潘太克斯(PENTAX)摄影镜头(供 645 单反相机用)

型　　号	G—E	θ	F_{min}	$S_{(0.1)}$	$\phi \times L$	Q	¥
A64 5 45mmf/2.8	8—9	76°	22	0.45	74 × 66.5	400	6.8
A64 5 55mmf/2.8	7—8	65°	22	0.45	74 × 60.5	410	5.9
A64 5 75mmf/2.8	5—6	50°	22	0.6	74 × 37.5	240	3.9
A64 5LS 75mmf/2.8	5—6	50°	22	0.75	76 × 49.5	365	7.5
A64 5 150mmf/3.5	4—4	26°	32	1.4	74 × 71.5	435	5.3
A64 5 300mmf/4ED [IF]	8—8	13.5°	32	3	93 × 208	1360	35
A64 5Zoom80mm—160mmf/4.5	11—11	47°—24.5°	32	1	82.5 × 131	1010	14

附表 1—22　　潘太克斯(PENTAX)摄影镜头(供 6×7 单反相机用)

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	φ × L	Q	¥
Fish - Eye67 35mmf/4.5	7—11	180°	22	0.45	102 × 73	920	10
67 45mmf/4	8—9	88°	22	0.37	91.5 × 57.5	485	8.4
67 55mmf/4	8—9	77°	22	0.4	91.5 × 75.5	615	9
67 75mmf/4.5	4—5	61°	22	0.7	91.5 × 81	700	5.3
67 90mmf/2.8	5—7	52°	22	0.65	91.5 × 60	485	8.37
67 90mmf/2.8	5—6	53°	22	0.85	91.5 × 63	610	5.8
67 105mmf/2.4	5—6	45°	22	1	91.5 × 60	628	5.55
Macro67 135mmf/4	3—5	36°	32	0.75	91.5 × 95	645	
67 165mmf/4	5—6	30°	22	1.6	91.5 × 98.5	835	
67 200mmf/4	4—4	26°	22	2.5	91.5 × 120	900	6.7
67 300mmf/4	5—5	17°	45	5	93 × 186	1.425	12.4
67 400mmf/4	5—5	12°	45	8	115 × 287	2,570	19.6
67 500mmf/5.6	4—4	10°	45	8	107 × 398	3,200	23.8
67 600mmf/4	5—6	8°	45	12	170 × 370	6,000	39.32
M * 67 800mmf/6.7 ED[IF]	8—9	6°	45	8	150 × 570	6,000	110.5
67 800mmf/4	6—6	6	45	20	236 × 611	17,700	68.65
Reflex67 1000mmf/8	6—9	5°	—	35	180 × 352	6.660	60.87
Shift67 75mmf/4.5	8—9	61°	32	0.7	97 × 106.5	950	20.5

近年来米诺尔它公司推销员为追求吉利，将 MINOLTA 在我国内地音译为“美能达”，在香港音译为“万能达”。

米诺尔它公司为 135 单镜头反光照相机配套之摄影镜头的种类、技术性能和价格，参见附表 1—23 和 1—24 中所示。

15. 日本腾龙（TAMRON）摄影镜头

日本腾龙股份有限公司于 1950 年创建，是专门生产摄影镜头的光学公司。

由于不同照相机生产厂家所产照相机的镜头座结构尺寸和像面定位距往往不同，因此腾龙公司为扩大产品销路，为所产摄影镜头设计了可卸联接环。摄影者只需根据所用照相机的型号，在摄影镜头后端安装上相应规格尺寸的联接环，就可将该摄影镜头安装在照相机上，进行正常摄影。

腾龙公司为 135 单镜头反光照相机生产一系列摄影镜头，其种类、技术性能和价格，参见附表 1—25 所示。

16. 日本适马（SIGMA）摄影镜头

日本适马股份有限公司是生产摄影镜头的专业公司。适马摄影镜头配备上各种联接环，可适用于不同照相机上。

供 135 单镜头反光照相机配套的适马摄影镜头，其种类、技术性能和价格见附表 1—26 所示。适马公司创建于 1961 年 9 月。

17. 日本图丽（TOKINA）摄影镜头

日本图丽光学股份有限公司创建于 1950 年，是生产摄影镜头的专业公司。图丽摄影镜头配备上各种联接环，可适用于不同照相机上。

图丽公司为 135 单镜头反光照相机生产一系列摄影镜头，其种类、技术性能和价格，参见附表 1—27 所示。

附表 1—23　　美能达 135 照相机用自动调焦(AF)摄影镜头

型　　号	G—E	θ	m_{max}	F_{min}	S_{max}	Φ_1	$\phi \times L$	Q
AF Fish Eye16mm F2.8	8—11	180°	0.15	2.2	0.2	内置	75 × 66.5	400
AF20mm F2.8 NEW	9—10	94°	0.13	22	0.25	72	78 × 53.5	285
AF24mm F2.8 NEW	8—8	84°	0.16	22	0.25	55	65.5 × 44	215
AF28mm F2	9—9	75°	0.13	22	0.3	55	65.5 × 49.5	285
AF28mm F2.8	5—5	75°	0.13	22	0.3	49	65.5 × 42.5	185
AF35mm F1.4G	8—10	63°	0.2	22	0.3	55	65.5 × 76	470
AF35mm F2	6—7	63°	0.17	22	0.3	55	65.5 × 48.5	240
AF50mm F1.4	6—7	47°	0.15	22	0.45	49	65.5 × 38.5	235
AF50mm F1.4	5—6	47°	0.15	22	0.45	49	65.5 × 39	170
AF85mm F1.4G	6—7	28°30′	0.128	22	0.85	72	78 × 72.5	550
AF100mm F2	6—7	24°	0.13	32	1.0	55	67 × 75.5	480

续附表 1—23

型　　号	G—E	θ	m_{max}	F_{max}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times l_r$	Q
AF17—35mm F3.5G	12—15	104°—63°	0.17	22	0.3	77	82.5 × 90.5	600
AF20—35mm F3.5—4.5	11—13	94°—63°	0.08	22—27	0.5	72	77.5 × 69.5	325
AF24—85mm F3.5—4.5NEW	12—14	84°—29°	0.17	22—27	0.5	62	74 × 73	415
AF28—70mm F2.8G	11—16	75°—34°	0.09	22	0.85	72	83 × 114.5	850
AF28—105mm F3.5—4.5NEW	10—13	75°—23°	0.21	22—27	0.5	62	74 × 80	485
AF28—80mm F3.5—5.6 Ⅱ SILVER	10—10	75°—30°	0.26	22—38	0.35	62	68 × 74	230
AF28—80mm F4—5.6	7—7	75°—30°	0.25	22—32	0.38	55	68 × 67.5	250
AF70—210mm F4.5—5.6	10—10	34°—12°	0.26	22—27	1.1	49	69 × 93	350
AF75—300mm F4.5—5.6NEW	10—13	32°—8°10′	0.25	32—38	1.5	55	72.5 × 122	525
High Speed AF80—200mm F2.8G	13—16	30°—12°30′	0.13	32	1.8	72	88.5 × 166.5	1280
AF APO 100—300mm F4.5—5.6	10—11	24°—8°10′	0.24	32—38	1.5	55	73.5 × 101.5	435
AF APO 100—400mm F4.5—6.7	11—14	24°—6°10′	0.25	32—45	2.0	72	79.5 × 149	840

续附表 1—23

型　　号	G—E	θ	m_{max}	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
Hight Speed AF APO200mm F2.8G	7—8	12°30′	0.16	32	1.5	72	86 × 134	790
Hight Speed AF APO 300mm F2.8G	9—11	8°10′	0.14	32	2.5	42	128 × 238.5	2480
Hight Speed AF APO300mm F4G	7—9	8°10′	0.14	32	2.5	42	91 × 220.5	1410
Hight Speed AF APO400mm F4.5G	7—9	6°10′	0.15	32	3.0	42	109 × 275	1920
Hight Speed AF APO 600mm F4G	9—10	4°10′	0.11	32	6.0	42	169 × 449	5500
AF Reflex 500mm F8	5—7	5°	0.13	8	4.0	专用	89 × 118	665
AF Soft Focus 100mmF2.8	7—7	24°	0.17	32	0.8	55	71.5 × 78	440
AF Macro 50mm F2.8NEW	6—7	47°	1.0	32	0.2	55	70 × 60	315
AF Macro 50mm F3.5	5—5	47°	0.5	32	0.23	55	66 × 55	240
AF Macro 100mm F2.8NEW	8—8	24°	1.0	32	0.35	55	71.5 × 98.5	510
AF1.4 × 增焦距镜 Ⅱ	4—5						64 × 20	175
AF2 × 增焦距镜 Ⅱ	5—6						64 × 43.5	210

附表 1—24　　美能达(MINOLTA)摄影镜头(供 135 单反相机用)

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	φ × L	Q	¥
7.5mmf 4MDFISHEYE	8—12	180	22	0.5	68 × 63	355	14.8
16mmf 2.8MD FISHEYE	7—10	180	22	0.25	64.5 × 43	265	7.8
17mmf 4MD	9—11	104	22	0.25	75 × 53	325	7.7
20mmf 2.8MD	9—10	94	22	0.25	64 × 43.5	240	6.8
24mmf 2.8MD	8—8	84	22	0.25	64 × 39	200	4
28mmf 3.5MD	5—5	75	22	0.3	64 × 40	170	2.6
28mmf 2.8MD	5—5	75	22	0.3	64 × 43	185	3.1
28mmf 2MD	9—9	75	22	0.3	64 × 50	265	5.8
35mmf 2.8MD	5—5	63	22	0.3	64 × 38	170	2.3
35mmf 1.8MD	6—8	63	22	0.3	64 × 48	240	3.8
50mmf 2MD	5—6	47	22	0.45	64 × 36	155	
50mmf 1.7MD	5—6	47	22	0.45	64 × 36	165	2
50mmf 1.1MD	6—7	47	16	0.45	64 × 40	235	3

续附表 1—24

型　　号	G--E	θ	F_{max}	S_{min}	φ × L	Q	¥
50mmf 1.2MD	6—7	47	16	0.45	65 × 46	310	5
85mmf 2MD	5—6	29	22	0.85	64 × 53.5	285	3.9
100mmf 2.5MD	5—5	24	22	1	64 × 65.5	310	3.7
135mmf 3.5MD	5—5	18	22	1.5	64 × 72.5	285	2.3
135mmf 2.8MD	5—5	18	22	1.5	64 × 81	385	3.5
135mmf 2MD	5—6	18	22	1.3	79 × 96	725	8.8
200mmf 4MD	5—5	12 30′	32	2.5	64 × 116.5	100	3.8
200mmf 2.8MD	5—5	12 30′	32	1.8	78 × 133	700	8.75
300mmf 5.6MD	5—5	8 10′	32	4.5	65 × 186	695	
300mmf 1.5MD	4—7	8 10′	32	3	77.5 × 177.5	705	6.25
100mmf 5.6MDAPOTELE	6—7	6 10′	32	5	82.5 × 256.5	1490	27
600mmf 6.3MDAPOTELE	8—9	4 10′	32	5	108.5 × 373.5	2100	43.5
250mm f5.6RF	5—6	10	16	2.5	66.5 × 58	250	5.3

续附表 1—24

型　　号	G—E	θ	F_{min}	S_{mun}	$\phi \times L$	Q	¥
500mmf 8RF	5—6	5°	16	4	83 × 98.5	600	8.6
800mmf 8RF	7—8	3°10′	16	8	127 × 178	1960	23.1
1600mmf 11RF	5—6	1°30′	22	20	179 × 325.5	6290	58
24—35mmf 3.5MD	10—10	84°—63°	22	0.3	67 × 50	285	4.9
24—50mmf 4MD	11—13	84°—47°	22	0.7	75 × 69.5	390	9.6
28—85mmf 3.5—4.5MD	10—13	75°—29°	22	0.8	65.5 × 86.5	470	6.5
35—70mmf 3.5MD	7—8	63°—34°	22	0.8	69 × 68.5	365	4
35—105mmf 3.5—4.5MD	12—14	63°—23°	22	1.5	64 × 88	430	6.5
35—135mmf 3.5—4.5MD	12—14	63°—18°	32	1.5	64 × 100	510	7.5
50—135mmf 3.5MD	10—12	47°—18°	32	1.5	68.5 × 118	480	7.1
70—210mmf 4MD	9—12	34°—12°	32	1.1	72 × 153	635	6.3
75—150mmf 4MD	8—12	32°—16°30′	32	1.2	64 × 113.5	445	4.5
100—200mmf 5.6MD	5—8	24°—12°30′	22	2.5	64 × 171.5	595	4.4

续附表 1—24

型　　号	C—E	θ	F_{min}	S_{min}	$\phi \times L$	Q	Y
100—300mmf 5.6MD	10—13	24°—8°10′	32	1.5	72 × 187	700	6.95
100—500mmf 8MD	11—16	24°—5°	32	2.5	90.5 × 331.5	2080	28.7
50mmf 3.5MDMACRO	4—6	47°	22	0.23	64 × 55.5	200	3.75
100mmf 4MDMACRO	4—5	24°	32	0.45	66 × 88.5	385	7.3
12.5mmf 2BELLOWS MICRO	4—4	—	16	—	33 × 23.5	40	3
25mmf 2.5BELLOWS MICRO	4—6	—	16	—	33.5 × 17	40	2.8
50mmf 3.5AUTOBELLOWS MACRO	4—6	—	32	—	57 × 24.5	110	2.6
100mmf 4AUTOBELLOWS MACRO	4—5	—	32	—	57 × 28.5	145	2.8
24mmf 2.8MD VFC	7—9	84°	22	0.3	64.5 × 50.5	340	6.1
35mmf 2.5SHIFT CA	7—9	63°	22	0.3	83.5 × 71.5	555	12.1
85mmf 2.8VARISOFT	5—6	29	16	0.8	70 × 80	430	8.6
MD2 × 300 S	6—7	—		—	65 × 41.5	230	3.5
MD2 × 300 L	3—5	—		—	65 × 52.5	230	3.5

附表 1—25　　腾龙 135 照相机用自动调焦(AF)摄影镜头

代号	型　号	G—E	θ	m_{max}	F_{min}	S_{min}	Φ_F	$\phi \times L$	Q
166D	SPAF24 – 40mmF2.7 – 3.5[IF]	12—15	94°—57°	1∶10.2	22	0.5	77	81.5 × 81	525
73D	AF24 – 70mmF3.3 – 5.6	7—8	84°—34°	1∶4.7	22	0.4	62	76.4 × 59.6	270
190D	SPAF24 – 135mmF3.5 – 5.6AD	10—14	84°—18°	1∶3.3		0.4		78.5 × 80.6	530
177D	AF28 – 80F3.5 – 5.6	7—7	75°—30°	1∶8	22	0.7	58	72 × 70.4	237
176D	SPAF28 – 105mmF2.8LD[IF]	13—15	75°—23°	1∶4.7	22	0.5	82	87 × 112	880
179D	AF28 – 105mmF4 – 5.6[IF]	12—15	75°—23°	1∶5.6	22	0.5	62	71 × 73	310
371D	AF28 – 200mmF3.8 – 5.6LD	14—16	75°—12°	1∶4	22	0.49	72	78 × 82	485
185D	AF28 – 300mmF3.5 – 6.3LD[IF]	14—15	75°—8°	1∶3.7	22	0.82	72	80.4 × 93.6	585
67D	SPAF70 – 210mmF2.8LD	13—17	34°—12°	1∶5.6	32	1.5	77	90 × 177.5	1340
472D	AF70 – 300mmF4 – 5.6LD	9—13	34°—8°	1∶38	22	1.5	58	73.6 × 115.5	505
572D	AF70 – 300mmF4 – 5.6LDMacro	9—13	34°—8°	1∶2	32	0.95	62	76.6 × 116.5	435
278D	AF80 – 210mmF4.5 – 5.6	8—9	30°—12°	1∶5.8	22	1.5	52	69 × 97.5	281
186D	AF100 – 300mmF5 – 6.3	9—12	24°—8°	1∶4	32	1.5	55	71 × 115.5	354
175D	AF200 – 400mmF5.6LD[IF]	11—13	12°—6°	1∶6.1	32	2.5	77	85.4 × 178	1260
69E	SPAF14mmF2.8[IF]	12—14	114°	1∶6.5	22	0.2		87 × 86.5	675
172E	SPAF90mmF2.8Macro	9—10	27°	1∶1	32	0.29	55	74 × 97	420
360D	SPAF300mmF2.8LD[IF]	7—10	8°	1∶7.1	32	2.5	43	120 × 214.9	2800
	AF1.4 × 增焦距镜	4—4						66.5 × 18.8	114
	AF2 × 增焦距镜	4—4						66.7 × 26	121
	SPAF2 × 增焦距镜	5—7						66.7 × 35.8	170

附表 1—26　　适马(SIGMA)摄影镜头(135 单反相机用)

型　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	m_{max}	Φ_F	$\phi \times L \times Q$
8mmF4 FISH－EYE(圆型鱼眼)	7—11	180°	22	0.20	—	22.5	73.5×59/375
14mmF3.5	11—13	114.2°	22	0.18	1∶6	セラチン	81×74.5/537
15mmF2.8 FISH－EYE(对角线鱼眼)	6—7	180°	22	0.15	—	セラチン	72.5×63.5/328
24mmF2.8	7—8	84.1°	22	0.18	1∶4	52	64×42.5/250
28mmF1.8IIASPHERICAL	8—9	75.4°	22	0.30	1∶7.5	58	69×61.5/290
50mmF2.8EX MACRO	9—10	46.8°	32	0.188	1∶1	55	71.4×64/320
105mmF2.8EX MACRO	9—10	23.3°	32	0.313	1∶1	58	74×95/450
180mmF2.8APO MACRO	11—13	13.7°	22	0.64	1∶2	82	85×180/11,395
180mmF5.6 APOMACRO	6—9	13.7°	22	0.55	1:2	52	69.5×103/433
300mmF2.8 APO	6—9	8.2°	22	2.5	1∶7.7	30.5(リア)	120×223/2.030
300mmF4 APO MACRO	7—10	8.2°	32	1.2	1∶3	77	90.5×194.2/1.335
14mmF4 APO MACRO(HSM)	7—10	8.2°	32	1.2	1∶3	77	92.5×196.7/1.470
400mmF5.6 APO MACRO	7—10	6.2°	32	1.6	1∶3	77	90.5×257.2/1.445
400mmF5.6 APO MACRO(HSM)	7—10	6.2°	32	1.6	1∶3	77	90.5×257.2/1.500
500mmF4.5 APO	8—10	5°	22	5.0	1∶9.8	30.5(リア)	143×312.5/3.320
600mmF8 MIRROR	4—7	4.1°	8(固定)	2	1∶3	95(30.5)	99×121/830
800mmF5.6 APO	9—13	3.1°	32	7	1∶8.3	46(リア)	158.5×415.5/5.950
1.4× AF APO TELE CONVERTER	3—5	—	—	—	—	—	68.5×19.5/143
2× AF APO TELE CONVERTER	5—6	—	—	—	—	—	68.5×52/234

续附表 1-26

型　号	G—E	θ	F_{min}	S_{min}	m_{max}	F_e	$\phi \times L \times Q$
18 – 35mmF3.5 – 4.5 ASPHERICAL	10—11	100.5°—63.4°	22—32	0.50	1∶12	82	88 × 71.5/280
24 – 70mmF3.5 – 5.6 ASPHERICAL	8—11	84.1°—34.3°	22—38	0.50	1∶6.2	55	70 × 63.5/265
28 – 70mmF2.8	10—13	75.4°—34.3°	22	0.50	1∶5.9	72	77 × 92.5/578
28 – 70mmF2.8 – 4UC	8—11	75.4°—34.3°	22—32	0.50	1∶6.1	55	70 × 63.5/285
28 – 80mmF3.5 – 5.6 MINI ZOOM MACRO	7—7	75.4°—30.3°	22—38	0.50	1∶2	55	69.5 × 69.5/255
28 – 105mmF2.8 – 4 ASPHERICAL	11—12	75.4°—23.3°	22—32	0.50	1∶5.4	72	77 × 79.5/405
28 – 105mmF4 – 5.6 UC	12—15	75.4°—23.3°	22—32	0.50	1∶5.3	58	70 × 71.5/340
28 – 200mmF3.8 – 5.6 ASPHERICAL	13—14	75.4°—12.3°	22—32	1.50	1∶2.2	72	77.1 × 77.5/450
70 – 200mmF2.8 EX APO 70 – 200mmF2.8 EX APO(HSM)	14—17	34.3°—12.3°	32	1.80	1∶7.8	77	86.2 × 183.7/1.270
70 – 210mmF3.5 – 4.5 APO MACRO	9—12	34.3°—11.8°	22—32	1.30	1∶2	58	77 × 117.5/600
70 – 210mmF4 – 5.6 UC-Ⅱ	9—13	34.3°—11.8°	22—32	1.20	1∶4.7	55	70 × 85/340
70 – 300mmF4 – 5.6 APO MACRO	11—14	34.3°—8.2°	22—32	1.50	1∶2	58	77 × 117/585
70 – 300mmF4 – 5.6 DL MACRO	11—14	34.3°—8.2°	22—32	1.50	1∶2	58	77 × 117.7/590
100 – 300mmF4.5 – 6.7 UC	10—13	24.4°—8.2°	22—32	2.00	1∶5.8	55	70 × 99/410
135 – 400mmF4.5 – 5.6 APO ASPHERICAL	11—13	18.2°—6.2°	32　38	2.00-2.20	1∶5.3	77	88.5 × 181.1/1.210
170 – 500mmF5 – 6.3 APO ASPHERICAL	11—13	14.5°—5°	32—38	3.00-3.20	1∶6.6	86	92.5 × 229.5/1.315

附表 1—27　　图丽(TOKINA)摄影镜头(135 单反相机用)

代　号	型　号	G—E	θ	S_{min}		F_{max}	Φ_F	L	ϕ	Q
AT－X 235AF PRO	20～35mm F2.8	11—15	96°20′—63°30′	0.5	—	22	77	85.5	84	585
NEW AT-X270AF PRO	28～70mm F2.8	12—16	75°20′—34°20′	0.7	—	22	77	109.5	79.5	760
AT－X 828AF PRO	80～200mm F2.8	11—17	30°20′—12°20′	1.8	—	32	77	1845	84	1,350
AT－X 840AF	80～400mm F4.5～5.6	10—16	29°50′—6°13′	2.5	1∶5.4	32	72	136	77.2	960
AT－X 340AF Ⅱ	100～300mm F4	10—16	24°30′—8°20′	2.0	—	32	77	230	83	1,580
AT－X 17AF	17mm F3.5	9—11	103°40′	0.25	—	22	72	80.5	80	400
AT－X M100AF	100mm F2.8	10—11	24°30′	0.35	1∶2	32	55	97.5	69	550
AT－X 300AF Ⅱ	300mm F2.8	7—9	8°20′	2.4	—	32	35.5/112（前部）	213.5	117	2,200
AT－X 304AF	300mm F4	7—9	8°20′	2.0	—	32	77	187	84	1,140

续附表 1—27

代　号	型　号	G—E	θ	S_{min}		F_{min}	Φ_f	L	ϕ	Q
AT－X 400AF	400mm F5.6	8—10	6°10′	2.5	1：5.8	32	72	202	78.5	990
AF235 Ⅱ	20～35mm F3.5～4.5	11—13	96°20′—63°30′	0.4	—	22	77	74.5	82.2	500
AF353	35～300mm F4.5～6.7	14—17	63°30′—8°20′	2.5	—	32	72	101.3	78.3	680
EMZ 280AF	28～80mm F3.5～5.6	8—8	75°20′—30°20′	0.6 (0.5)	1：5.3	16	58	73.7	68.5	276
EMZ 282AF	28～210mm F3.5～5.6	12—14	75°20′—11°50′	1.9	—	16	72	112	76	490
EMZ 130AF	100～300mmF5.6～6.7	8—10	24°30′—8°20′	1.7 (1.5)	1：4	32	55	137.5	69	466
AT-X 150	150～500mm F5.6	13—15	16°30′—4°57′	3.1	—	32	35.5/95 (前部)	314.5	104	2,230
SZ-X 270	28～70mm F3.5～4.5	9—10	75°20′—34°20′	0.7 (0.31)	1：4	22	52	64.7	64	325
SZ-Z 205	28～105mm F3.5～4.8	12—15	75°20′—22°40′	0.5	1：5	22	62	69.8	65	380
SZ-X 730	75～300mm F4.5～5.6	8—11	32°10′—8°20′	1.7 (1.5)	1：3.8	22	58	152.5	66	730

附录二　世界著名电影摄影镜头的种类与技术性能

1. 甘肃光学仪器总厂甘光牌电影摄影镜头

甘肃光学仪器总厂系六十年代中期由南京电影机械厂等单位援建起来的工厂，厂址在甘肃省临夏市，目前以生产电影摄影机和电影放映机、照相机为主要任务。著名产品有和平牌 S35Ⅱ型、S35Ⅲ型 35 毫米电影摄影机、红旗牌 S16 型 16 毫米电影摄影机、甘光牌 304C 型 135 袖珍照相机。

甘肃光学仪器总厂生产的甘光牌电影摄影镜头的种类、技术性能见附表 2—1 和附表 2—2 中所示。

附表 2—1　　甘光牌 35 毫米电影摄影镜头

型　　号	f	$\theta_{对}$	F	S_{min}	Γ_B
F_{18}	18.27	74°	2 ~ 22	0.3	28.98
F_{28}	28.09	52°	2 ~ 22	0.3	30.03
F_{40}	40.116	37°30′	2 ~ 22	0.5	28.3
F_{75}	74.23	20°24′	2 ~ 22	1	34.6
F_{300}	298.39	5°	4 ~ 22	6	84.04

2. 长春市第二光学仪器厂凤凰牌电影摄影镜头

长春市第二光学仪器厂除生产无标尺测距仪、投影光学仪器等仪器外，还生产电影摄影镜头、电影放映镜头、照相镜头，以

及滤光镜。

长春市第二光学仪器厂所产电影摄影镜头的种类、技术性能见附表 2—3 和附表 2—4 中所示。

附表 2—2　　甘光 16 毫米电影摄影镜头

型　　号	f	$\theta_{对}$	F	S_{min}	f_f
F_{16}	15.94	44°52′	1.9 ~ 22	0.5	20.85
F_{25}	24.67	28°30′	1.5 ~ 22	0.5	20.85
F_{50}	49.88	14°36′	1.6 ~ 22	1	20.85
F_{10}	9.98	29°59′	1.6 ~ 22	0.3	20.85

附表 2—3　　长春二光 35 毫米电影摄影镜头

型　　号	f	C—E	$\theta_{对}$	F	S_{min}	f_B	$\phi \times L$	Q (kg)
JSD35—20	20	11—12		1.2 ~ 22	0.2	52		
JSD35—35	35	7—9		1.15 ~ 22	0.4	52		
JSD35—50	50	7—8		1.15 ~ 22	0.7	52		
JSD35—85	85	7—8		1.3 ~ 22	1	52		
JS35—30 ×	25 ~ 750	9—14	57° ~ 2.3°	3.5 ~ 22	3	52	ϕ142 × 401	5.5
JS35—10 ×	25 ~ 250	10—14	57° ~ 6°	3.2 ~ 22	1.7	52	ϕ110 × 308.5	2.3
SJ—10 ×	25 ~ 250	12—16	57° ~ 6°	3.2 ~ 22	1.7	52	ϕ111 × 285	3.1
JSB35—10 ×（变形宽银幕电影用）	25 ~ 250	15—22		3.2 ~ 22				

附表 2—4　　长春二光 16 毫米电影摄影镜头

型　　号	f	C—E	$\theta_{对}$	F	S_{min}	f_F	$\phi \times L$	Q (kg)
JS16—20 ×	10 ~ 200	11—15	66 ~ 3.3	3.2 (4.8) ~ 22	1.2	17.52	76 × 187	0.85
JS16—10 ×	9.5 ~ 95	15—22	69 ~ 7	2.2 ~ 22	0.75	17.52	85 × 218	1.4

3. 英国柯克（COOKE）电影摄影镜头

英国兰克·泰勒·哈勃森（Rank Taylor Hobson）公司创建于1886年，目前除生产一系列精密测试仪器外，还生产世界著名的柯克牌电影摄影镜头。

闻名世界的三组三片式柯克镜头（Cooke Triplet），就是该公司于1894年推出的杰作。此后，该公司在摄影镜头，尤其是电影摄影镜头的设计、生产方面处于世界领先地位。1970年柯克5×变焦距摄影镜头（焦距20～100mm）的问世，又以其高超的成像质量闻名世界。

兰克·泰勒·哈勃森公司生产的柯克变焦距摄影镜头的种类、技术性能、价格见附表2.5和附表2.6中所示。

4. 德国卡尔·蔡司（CARL·ZEISS）电影摄影镜头

卡尔·蔡司公司生产的电影摄影镜头除是联邦德国产阿里弗莱克斯（ARRIFLEX）电影摄影机的配套摄影镜头外，还被一些其它电影摄影机厂家选用。

卡尔·蔡司电影摄影镜头的种类、技术性能及价格见附表2.7和附表2.8所示。

5. 德国阿莱（ARRI）电影摄影镜头

联邦德国阿诺尔德和里希特电影技术公司（Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co）是世界著名的电影摄影机生产厂家。该公司系由阿诺尔德先生和里希特先生联合创建。该公司所生产之产品的名称——阿里弗莱克斯（ARRIFLEX），就是以上述二位先生的姓名的词头AR和RI，加上德文单词“反光”（REFLEX）的词尾FLEX构成的。该公司又简称为阿莱公司。

阿莱公司目前主要生产阿里弗莱克斯35BL4型、35Ⅲ型、35Ⅲ

附表 2—5　　柯克(COOKE)电影变焦距摄影镜头

用　途	f	G—E	$\theta_{对}$	F	S_{min}	f_B	$\phi \times L$	Q(kg)
35mm 电影用	20 ~ 100(5 ×)	11—21	70—16	2.8(T3.1) ~ 22	0.7	54.3	145 × 370	4
	25 ~ 250(10 ×)	10—16	56—6	3.6(T3.9) ~ 22	1.6		121 × 350	4.2
	14 ~ 70(5 ×)		76—	2.8(T3.1) ~ 22	0.7		191 × 406	5.8
	20 ~ 60(3 ×)		58—	2.8(T3.1) ~ 22	0.63		116 × 280	2.2
超 16mm 电影用	10 ~ 30(3 ×)		58—	T1.6(1.3) ~ T22	0.63		121 × 280	2.2
	10.1 × 52(5 ×)		60—	T2.8(2.5) ~ T22	0.45		83 × 220	
16mm 电影用	9.5 ~ 47.5(5 ×)		70—16	T1.5(1.3) ~ T16	0.68	28	115 × 350	4
	9 ~ 50(5.5 ×)		60—	T2.5(2.2) ~ T22	0.15		83 × 220	1

附表 2—6　　柯克(COOKE)电影定焦距摄影镜头

型　　号	f	F_{max}
Speed Panchro(快速全色型)	18	2(T2.2)
	25	2(T2.2)
	32	2(T2.3)
	10	2(T2.3)
	50	2(T2.3)
	70	2(T2.3)
Deep Field Panchro(深视场全色型)	100	2.5(T2.8)
Tele Panchro(摄远全色型)	152	2.8
	203	1
	318	1

附表 2—7　　卡尔·蔡司（CARL·ZEISS）35 毫米电影摄影镜头

型　　号	G—E	$\theta_{水}$	F	S_{mor}	L	Q
DISTAGON 18mm f/1.2	11—13	66°	T1.3 ~ T16	0.25	93	1130
DISTAGON 25mm f/1.2	9—10	51°	T1.3 ~ T16	0.25	65	820
DISTAGON 35mm f/1.2	6—8	37°	T1.3 ~ T16	0.35	65	710
PLANAR 50mm f/1.2	5—7	28°	T1.3 ~ T16	0.70	65	670
PLANAR 85mm f/1.2	5—6	16°	T1.3 ~ T16	0.9	65	940
PLANAR 135mm f/1.2	5—5	10.5°	T2 ~ T16	1.5		920
DISTAGON 10mm f/2.0	13—16	97.6°	T2.1 ~ T22	0.35	144	2950
ARRI 12mm f/2		80°	T2.1 ~ T22	0.25	87	500
Distagon 14mm f/1.8		74.4°	T2 ~ T22	0.23	112	500
Distagon 16mm f/2		72°	T2.1 ~ T22	0.25	55	550
Distagon 20mm f/2		62°	T2.1 ~ T22	0.20	55	600
Distagon 24mm f/2		52°	T2.1 ~ T22	0.35	55	470
Distagon 28mm f/2		46°	T2.1 ~ T22	0.28	78	
Planar 32mm f/2		41°	T2.1 ~ T22	0.60	55	320
Planar 40mm f/2		33°	T2.1 ~ T22	0.40	55	390
Planar 50mm f/2		26°	T2.1 ~ T22	0.45	55	400
Makro Planar 60mm f/2.8		22°	T3.0 ~ T32	0.27	89	690
Planar 85mm f/2		16°	T2.1 ~ T22	0.90	55	560
Planar 100mm f/2		14°	T2.1 ~ T22	1	76	770
Planar 135mm f/2		10°	T2.1 ~ T22	1.5	93	945
Sonnar 180mm f/2.8		7.7°	T3.0 ~ T32	1.5	124	945
Tele Apotessar 300mm f/2.8		4.5°	T3.0 ~ T32	3.5	238	3200
Converter 倍率镜 （供焦距 300mm 镜头用）					51	500

附表 2—8　　卡尔·蔡司（CARL ZEISS）16 毫米电影摄影镜头

型　　号	C～E	$\theta_{水}$	F	S_{min}	L	Q
Distagon 9.5mm f/1.2	10—12	55.5°	T1.3～T16	0.25	65	650
Distagon 12mm f/1.2	9—11	45°	T1.3～T16	0.2	65	450
Distagon 16mm f/1.2	9—11	35°	T1.3～T16	0.2	65	400
Distagon 25mm f/1.2	6—9	23°	T1.3～T16	0.25	65	360
Planar 50mm f/1.2		12°	T1.3～T16	0.7	65	550
Vario Sonnar 10～100mm f/1.8		53° ～6°	T2～T16	1	153	1500
Distagon 8mm f/2		63°	T2.1～T22	0.2	50	500
Distagon 16mm f/2		35°	T2.1～T22	0.25	55	550
Distagon 20mm f/2		29°	T2.1～T22	0.2	55	600
Distagon 24mm f/2		24°	T2.1～T22	0.35	55	470
Distagon 28mm f/2		21°	T2.1～T22	0.28	78	
Planar 32mm f/2		18°	T2.1～T22	0.6	55	320
Planar 40mm f/2		15°	T2.1～T22	0.4	55	390
Planar 50mm f/2		11°	T2.1～T22	0.45	55	400
Makro Planar 60mm f/2.8		9.5°	T3～T32	0.27	89	690
Planar 85mm f/2		6.9°	T2.1～T22	0.9	55	560
Planar 100mm f/2		5.9°	T2.1～T22	1	76	770
Planar 135mm f/2		4.4°	T2.1～T22	1.5	93	945
Sonnar 180mm f/2.8		3.3°	T3～T32	1.5	124	945
Tele Apotessar 300mm f/2-8	2°	T3—T32	3.5	238	3200	
Converter 倍率镜 （供焦距 300mm 镜头用）					51	500
VARIO-SONNA11-110mm f/2 （供超 16 毫米电影摄影用）	14—19	56.7° —6.5°	T2.2～T16	1.5	152.6	1490

C 型 35 毫米电影摄影机，以及阿里弗莱克斯 16SR Ⅱ型 16 毫米电影摄影机。

二十世纪八十年代阿里公司开始生产莱微距（ARRI MACRO）35 毫米电影摄影镜头，并与德国艺视高光学公司（ISCO OPTIC GMBH）联合生产出阿里斯柯普（ARRISCOPE）35 毫米变形宽银幕电影摄影镜头。

二十世纪九十年代阿莱公司又推出了阿莱透视调整电影摄影镜头，并与德国卡尔·蔡司公司合作生产出“超精华”系列电影摄影镜头。

阿莱公司所产 35 毫米电影摄影镜头的种类和技术性能，参见[①] 附表 2—9 和 2—10、2—11、2—12 中所示。

6. 法国昂热尼厄（ANGÉNIEUX）电影摄影镜头

昂热尼厄公司系由法国人皮埃尔·昂热尼厄（Pierre Angénieux）先生于 1935 年创立，并以其姓名作为公司的名称。昂热尼厄本人就是一位著名的光学设计人员。该公司于 1938 年扩大到照相领域。

国内电影界过去误按英语发音将法文 Angénieux 译作“安琴”摄影镜头。

法国昂热尼厄公司生产的电影摄影镜头的种类和技术性能，见附表 2—13 和附表 2—14 所示。

7. 日本佳能（CANON）电影摄影镜头

日本卡侬（近年外商为求吉利译为“佳能”）股份有限公司生产的电影摄影镜头的种类和技术性能，见附表 2—15 中所示。

---

① 附表 2—7 至附表 2—18 中所列价格，均系香港捷成洋行提供。

附表 2—9　　阿莱微距(ARRI)35 毫米电影摄影镜头

型　　号	G—E	$\theta_{水}$	F	S_{min}	$L_{光}$	Q
ARRI MACRO 2.0/16mm	9—9	72°	T2.1 ~ T22	0.15(M1:4)	70.1	750
ARRI MACRO 2.0/24mm	5—7	52°	T2.1 ~ T22	0.15(M1:4)	57.6	700
ARRI MACRO 2.0/32mm	5—6	41°	T2.1 ~ T22	0.21(M1:4)	22.2	550
ARRI MACRO 2.0/40mm	4—6	33°	T2.1 ~ T22	0.25(M1:4)	28.3	600
ARRI MACRO 2.8/50mm	6—7	26°	T3 ~ T64	0.2(M1:1)	28.1	1000
ARRI MACRO 2.8/100mm	8—8	14°	T3 ~ T64	0.354(M1:1)	70.2	1500
ARRI MACRO 4.0/200mm	6—9	7°	T4.3 ~ T64	0.59(M1:1)	106.2	1850

附表 2—10　　阿莱斯柯普(ARRISCOPE)35 毫米变形宽银幕电影摄影镜头

型　　号	G—E	$\theta_{水}$	F	S_{min}	$L_{光}$	Q
ARRISCOPE 2.0/32mm	14—19	69°	T2.3 ~ T22	0.8	227.4	6700
ARRISCOPE 2.0/40mm	11—16	60°	T2.3 ~ T22	1	170.5	3300
ARRISCOPE 2.0/50mm	10—16	50°	T2.3 ~ T22	1	176.6	3500
ARRISCOPE 2.0/75mm	13—17	34°	T2.3 ~ T22	1.1	295.7	6200
ARRISCOPE 2.8/100mm	11—16	25°	T3 ~ T22	1.2	290.9	6300
ARRISCOPE 2.8/135mm	9—14	20°	T3 ~ T22	1.3	288.4	5000

附表 2—11

阿莱（ARRI）透视调整（Shift & Tilt Bellows）35mm 电影摄影镜头

	C—E	像场直径 mm	1.85:1 画幅		TV 画幅		T	ϕ	Q
			水平位移	垂直位移	水平位移	垂直位移			
18mmT3.8	10—11	38.6	61	35	59	46	3.8—22	95	330
20mmT2.8	9—11	43.2	55	32	54	42	2.8—22	87	350
24mmT4	9—11	58.2	47	27	46	35	4—22	87	480
28mmT2.8	10—12	58.2	41	23	40	30	2.8—22	87	400
35mmT2.8	7—7	58.2	33	18	32	25	2.8—32	87	300
45mmT2.8	9—10	58.2	26	14	25	19	2.8—22	87	500
60mmT3.5	7—7	58.2	20	11	19	14	3.5—22	87	590
80mmT1.9	6—7	58.2	15	8	14	11	1.9—22	87	510
90mmT2.8	5—6	58.2	13	7	13	10	2.8—22	87	440
110mmT2	6—7	58.2	11	6	10	8	2—16	87	780
150mmT2.8	4—5	58.2	8	4	8	6	2.8—22	87	680

附表 2—12

蔡司·阿莱（CARL ZEISS/ARRIFLEX）超精华

（ULTRA PRIMES）35 毫米电影摄影镜头

型　　号	C—E	$\theta_{水}$		F	S_{min}	ϕ × L	Q
		超 35	35				
Distagon 10mm f/2.0	13—16	100.20°	90.80°		0.35	156 × 195	2903
Distagon 14mm f/1.7	12—14	80.60°	75.60°		0.22	114 × 164	1814
Distagon 16mm f/1.7	12—14	75.60°	70.80°		0.24	95 × 143	1406
Distagon 20mm f/1.7	11—12	62.80°	58.40°		0.28	95 × 143	1225
Distagon 24mm f/1.7	9—12	54.20°	50.20°		0.3	95 × 143	998
Distagon 28mm f/1.7	10—11	46.80°	43.20°		0.3	95 × 143	998
Distagon 32mm f/1.7	9—10	41.60°	38.20°		0.35	95 × 143	1089
Distagon 40mm f/1.7	8—9	33.20°	30.60°		0.4	95 × 143	998
Planar 50mm f/1.7	7—8	26.20°	24.00°		0.6	95 × 143	998
Planar 85mm f/1.7	7—8	16.50°	15.20°		0.9	95 × 143	998
Planar 100mm f/1.7	7—8	13.70°	12.60°		1	95 × 143	1225
Sonnar 135mm f/1.7	7—8	10.20°	9.30°		1.5	95 × 170	1588

附表 2—13　　昂热尼厄（ANGÉNIEUX）35 毫米电影摄影镜头

型　号	f	$\theta_{水}$	F	S_{min}	G—E	$\phi \times L$	Q
R62	14.5	85°	T3.8（3.5）～T16			40×58.5	75
R2	18.5	71°	T2.4（2.2）～T16			40×63.7	60
R2	24	60°	T2.4（2.2）～T16			47.5×82.7	70
S2	28	51°	T1.9（1.8）～T16			32.5×46.8	45
S2	32	45°	T1.9（1.8）～T16			35.5×49.4	50
S2	40	37°	T1.9（1.8）～T16			38×61.3	70
S2	50	29°	T2（1.8）～T16			41×74.9	90
M1	50	29°	T1.1（0.95）～T22			71×100	560
S3	75	21°	T2（1.8）～T22			57×106	230
S3	100	15°	T2.2（2）～T22			63×142	420
4×35T1	35～140	43°～12°	T4.4（3.5）～T22	1.5		60.5×186	690
6×17	17～102	79°～15°	T2.9（2.5）～T22	0.75			7800
6×20L2	20～120	68.5°～13°	T2.9（2.6）～T22	1	14—20	126×350	4100
10×25HP	25～250	55～$6\frac{1}{3}$	T3.7（3.2）～T22	1.7		138×	3600
10×25T2	25～250	57°～6°	T3.9（3.2）～T22	1.7	11—14	112×313	2300
10×24A	24～240	59°～6°30′	T3.8（2.6）～T22	1.4		150×742	2000
6×19.5（超 35）	19.5—117	66°～12°	T3.3（2.8）～T22	0.75			7800
10×30HR（超 35）	30—300	45°～$4\frac{3}{4}$°	T4.4（3.9）～T22	1.7			4300

附表 2—14　　昂热尼厄（ANGÉNIEUX）16 毫米电影摄影镜头

型　号	f	$\theta_{水}$	F	S_{min} [S_M]	$\phi \times L$	Q	f_B
R7	5.9	94°	T2（1.8）~ T22		76 × 94	380	
R21	10	64°	T2（1.8）~ T22		41.7 × 68.1	160	
R22	10	64°	T2（1.8）~ T22		41.7 × 68.1	160	
R41	15	47°	T1.5（1.3）~ T16		41.7 × 72.2	180	
S41	25	30°	T1.5（1.4）~ T22		41.7 × 58.2	120	
S42	25	30°	T1.5（1.4）~ T22		41.7 × 58.2	120	
M1	25	30°	T1.1（0.95）~ T22		41.7 × 58.2	140	
M2	28	26°	T1.2（1.1）~ T22		58 × 148	410	
S5	50	15°	T1.6（1.5）~ T22		47.6 × 88.5	230	
P3	75	10°	T2.7（2.5）~ T32		41.7 × 69.5	160	
P2	100	7°	T2.7（2.5）~ T32		49.5 × 102.2	270	
4	150	5°	T2.9（2.7）~ T32		65 × 153.6	600	
2.8 × 16	16 ~ 44	35° ~ 13°	T1.3 ~ T22	1.5［1］	74 × 192.8	1140	
4 × 17	17 ~ 68	41° ~ 11°	T2.5（2.2）~ T22	1.2	52 × 115.5	400	14.37
4 × 17.5	17.5 ~ 70	41° ~ 11°	T2.5（2.2）~ T22	1.2	52 × 139	400	20.85
6 × 9.5	9.5 ~ 57	68° ~ 13°	9.5：T1.8 57：T2.4	0.6	68 × 190	820	24.66
6 × 12.5	12.5 ~ 75	54° ~ 9°30′	T2.5（2.2）~ T22	1.2	59 × 157	530	20.7
10 × 9.5	9.5 ~ 95	68° ~ 7°30′	T2.8（2.2）~ T22		89 × 227	1360	
10 × 12	12 ~ 120	56° ~ 6°	T2.5（2.2）~ T22	1.5	75 × 195	860	20
12 × 10	10 ~ 120	$56\frac{1}{4}$° ~ 6°	T2（1.8）~ T22	1.5	132 × 249.7	2100	
15 × 10	10 ~ 150	53° ~ 4°	T2.3（2）~ T22	1.5	74 × 188.3	920	
20 × 12	12 ~ 240	56° ~ 3°	T4.2（3.5）~ T22	1.5	100 × 248	1970	20
12 × 11.5（超 16）	11.5 ~ 138	64° ~ 6°	T2.3 ~ T22	1.5［1］		2500	

附表 2—15　　佳能（CANON）35 毫米电影摄影镜头

型　　号	G—E	F_{min}	S_{min}	L	Q（kg）	f_B
K35、24mmT1.6	8—10	T22	0.3	72.02		
K35、35mmT1.4	9—10	T16	0 3	87.1		
K35、55mmT1.4	6—8	T22	0.6	56.74		
K35、85mmT1.4	6—8	T22	0.9	72.2		
K35MACRO K5×25（f=25～125）T2.8	15—19		1.2	257.9	4	56.18

8. 瑞士鲍莱克斯 16 毫米电影摄影机用斯威它（SWITAR）摄影镜头

瑞士鲍莱克斯（BOLEX）公司主要生产 16 毫米电影摄影机，常见型号有 H16RX-5 型、H16EL 型、H16EBM 型、H16SBM 型等摄影机。该公司还生产为上述电影摄影机配套的斯威它摄影镜头。

鲍莱克斯公司生产的摄影镜头的种类和技术性能，见附表 2—16 中所示。

附表 2—16　　斯威它（SWITAR）16 毫米电影摄影镜头

型号	G—E	$\theta_{水}$	F_{min}	S_{min}［S_K］
SWITAR100mmf/1.6RX		52°	22	8 英寸
MACRO-SWITAR、26mmf/1.1RX		21°	22	20 英寸〔$7\frac{1}{2}$英寸〕
MACRO-SWITAR、75mmf/1.9		7°	22	5 英尺〔$2\frac{1}{2}$英寸〕
MACRO-YVAR、150mmf/3.3		3.5°	22	15 英尺［6 英尺 5 英寸］
Kern Vario-Switar 100PTL 12.5～100mmf/2	11—19	41°12′～5°28′	16	1.2m
Kern Vario Switar12.5～100mmf/2	11—19		22	1.2m

9. 日本尼柯（NIKKOR）电影摄影镜头

日本尼康公司生产的尼柯 16 毫米电影摄影镜头的种类和技术性能，见附表 2—17 所示。

10. 日本柯瓦（KOWA）35 毫米变形宽银幕电影摄影镜头

日本柯瓦股份有限公司是生产电影、电视、照相用摄影镜头、放映镜头和望远镜的光学公司。其中柯瓦公司生产的柯瓦·普罗米那（KOWA-PROMINAR）35 毫米变形宽银幕电影摄影镜头的种类和技术性能，见附表 2—18 中所示。

附表 2—17　　尼柯(NIK KOR)16 毫米电影摄影镜头

型　　号	G—E	$\theta_{对}$	F_{min}	S_{min}	$\phi \times L$	Q
Cine-Nikkor 6.5mmf/1.6	10—12	101°	16	0.15	75 × 58.5	270
Cine-Nikkor 10mmf/1.8	9—10	74°	22	0.3	42 × 57	145
Cine-Nikkor 13mmf/1.8	7—8	60°	22	0.3	42 × 57.45	150
Cine-Nikkor 25mmf/1.4	5—7	32°22′	22	0.6	42 × 57	140
Cine-Nikkor 50mmf/1.8	4—4	17°	22	1	42 × 52.5	175
Cine-Nikkor 100mmf/2.8	3—5	8°30′	22	1.2	42 × 89.5	210

附表 2—18　　柯瓦(KOWA)35 毫米变形宽银幕电影摄影镜头

型　号	G－E		θ	F	S_{min}	$\phi \times L$	Q
	主镜头	变形系统					
LNBS 40	5－7	2－5	30°41′ × 13°08′	T2.3(2) ~ T22	3 英尺	74 × 113	840
LNBS 50	5－7	2－5	24°45′ × 10°35′	T2.3(2) ~ T22	3 英尺	74 × 118.5	900
LNBS 75	4－6	2－5	16°39′ × 7°06′	T2.8(2.5) ~ T22	5 英尺	74 × 148	1150
LNBS 100	4－6	2－5	12°31′ × 5°20′	T3.4(3) ~ T22	5 英尺	74 × 179.5	1350

附录三　世界著名电视摄像镜头的种类与技术性能

1. 德国施耐德（SCHNEIDER）电视摄像镜头

德国施耐德光学公司生产的电视摄像镜头的种类和技术性能，见附表 3－1 中所示。

2. 法国昂热尼厄（ANGÉNIEUX）电视摄像镜头

法国昂热尼厄公司生产的电视摄像镜头的种类和技术性能，见附表 3－2 中所示。

3. 日本富士侬（FUJINON）电视摄像镜头

日本富士（FUJI）公生产的富士侬电视摄像镜头的种类和技术性能，见附表 3－3 至附表 3－6 中所示。其中 HD（High Definition）为高清晰度摄像机镜头，EFP（Electronic Field Production）为电子现场制作摄像机镜头，ENC（（Electronic News Gathering）为电子新闻采集（即便携式）摄像机镜头。

4. 日本佳能（Canon）电视摄像镜头

日本佳能公司生产的电视摄像镜头的种类和技术性能，见附表 3－7 和附表 3－8 中所示。

5. 日本尼柯（NIKKOR）电视摄像镜头

日本尼康公司近年来开发了供高清晰度电视摄像用变焦距摄像镜头——2/3″英寸摄像机用S15×8.5B和S13×9B1型摄像镜头。其技术性能见附表3—9中所示。

附表 3—1　　施耐德(SCHNEIDER)电视摄像镜头

型　　号	2/3"摄像管用				1"摄像管用	
	TV56、14×	TV66、15×	TV80、17×	TV85、35×	TV64、14.5×	TV91、35×
f	9 ~ 126	8.8 ~ 130	8.5 ~ 150	11 ~ 385	13 ~ 190	16 ~ 560
$f_{2\times}$	18 ~ 252	17.6 ~ 260	17 ~ 300	22 ~ 770	26 ~ 380	32 ~ 1120
$f_{\times}$	14×	15×	17×	35×	14.5×	35×
F_{max}	1:1.7(9 ~ 100)	1:1.4(8.8 ~ 100)	1:1.4(8.5 ~ 100)	1:1.4(11 ~ 205)	1:1.7(13 ~ 130)	1:2(16 ~ 296)
	1:2.1(126)	1:1.7(130)	1:2(150)	1:2.6(385)	1:2.5(190)	1:3.8(560)
$F_{max}(2\times)$	1:3.4(18 ~ 200)	1:2.8(17.6 ~ 200)	1:2.8(17 ~ 200)	1:2.8(22 ~ 410)	1:3.4(26 ~ 260)	1:4(32 ~ 592)
	1:4.2(252)	1:3.4(260)	1:4(300)	1:5.2(770)	1:5(380)	1:8(1120)
S_{min}	0.8	0.45	0.7	3	0.4	3
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$	53° × 40°(9)	56° × 42°(8.8)	56° × 42°(8.5)	42.6° × 32.6°(11)	56° × 42°(13)	42.6° × 32.6°(16)
	4° × 3°(126)	4° × 3°(130)	2° × 1.5°(150)	1.4° × 1°(385)	4° × 3°(190)	1.4° × 1°(560)
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$	27° × 20°(18)	28° × 21°(17.6)	28° × 21°(17)	21.3° × 16.3°(22)	28° × 21°(26)	21.3° × 16.3°(32)
(2×)	2.2° × 1.5°(252)	2° × 1.5°(260)	1° × 0.8°(300)	0.7° × 0.5°(770)	2° × 1.5°(380)	0.7° × 0.5°(1120)
b × h	54 × 41	43 × 32	53 × 10	67.9 × 50.2	43 × 32	67.9 × 50.7
b × h(2×)	27 × 20	21.5 × 16	26.5 × 20	33.9 × 25.1	21.5 × 16	33.9 × 25.3
L × B × H	195(长)	480 × 200 × 270	450 × 200 × 235	550 × 215 × 270	480 × 200 × 270	550 × 215 × 270
Q(kg)	1.8	19	15	23	19	23
f_0	42.5 ~ 47.6					
f_3 微调	± 0.6					

附表 3—2　　昂热尼厄(ANGÉNIEUX)电视摄像镜头

型　号	2/3"摄　像　管　用			1"　摄　像　管　用		
	14 × 8	14 × 9	40 × 9.5	40 × 14	42 × 12.5	42 × 24
	f8 ~ 112	9 ~ 126	9.5 ~ 380	14 ~ 560	12.5 ~ 525	24 ~ 1000
$f_{2\times}$	16 ~ 224	18 ~ 252		30 ~ 1200		
$f_{\times}$	14 ×	14 ×	40 ×	40 ×	42 ×	42 ×
F_{max}	f/1.6 ~ 2 T1.8 ~ T2.2	f/1.6 ~ 2 T1.8 ~ T2.2	f/1.3(f = 9.5 ~ 195) f/1.4(f = 255) f/2.1(f = 380)	f/1.9(f = 14 ~ 285) f/2(f = 370) f/3(f = 560)	f/1.5(f = 12.5) f/5.3(f = 52.5)	f/1.7(f = 24) f/5.7(f = 1000)
F_{max} (2 ×)	f/3.2 ~ 4 T3.5 ~ T4.4	f/3.2 ~ 4 T3.5 ~ T4.4		f/4.4(f = 30 ~ 800) f/6.4(f = 1200)		
S_{min}	0.8	0.8	2.5		0.64	4
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$	58° × 45°(8)	52° × 40°(9)	$49\frac{3}{4}° \times 37\frac{3}{4}°$	$49\frac{3}{4}° \times 37\frac{3}{4}°$	56° × 43°	30° × 22°
	$4\frac{1}{2}° \times 3\frac{1}{4}°$(112)	4° × 3°(126)	$1\frac{1}{3}° \times 1°$	$1\frac{1}{3}° \times 1°$	$1\frac{1}{2}° \times 1°$	0.7° × 0.5°
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (2 ×)	$30\frac{3}{4}° \sim 23\frac{1}{4}°$(16)	27° × 21°(18)		24° × 18°		
	$2\frac{1}{4}° \sim 1\frac{3}{4}°$(224)	$2° \times 1\frac{1}{2}°$(252)		$\frac{1}{2}° \times \frac{1}{2}°$		
b × h	68 × 51	54 × 40	55 × 41.5	55 × 41.5	22 × 17	50 × 37
b × h (Macro)	61 × 46	52 × 39				
b × h(2 ×)	34 × 25	27 × 20		26.2 × 19.8		
h × h(2 × Macro)	30 × 23	26 × 19				
Q(kg)	1.8	1.5	19.5	19.5	26	34

附表 3—3　　富士依(FUJINON)供电影制作用的 2/3"高清晰度电视(HDTV)摄影镜头

型　　号	HA10 × 5B-10	HA20 × 7.8B-10	HAF5B-10
f	5 ~ 50mm	7.8 ~ 156mm	5mm
f ×	10 ×	20 ×	—
F_{max}	2.4(5.0 ~ 44mm) 2.7(50mm)	2.4(7.8 ~ 146mm) 2.7(156mm)	2.0
S_{min}	0.87m	1.17m	0.5m
b × h	5mm　1218 × 685mm 50mm　122 × 69mm	7.8mm　1044 × 587mm 156mm　52 × 29mm	579 × 325mm
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$	5mm　87°36′ × 56°39′ 50mm　10°57′ × 6°10′	7.8mm　63°10′ × 38°07′ 156mm　3°31′ × 1°59′	87°36′ × 56°39′
MACRO	有	有	—
ϕ × L	ϕ85 × 226.5mm	ϕ110 × 229.5mm	ϕ120 × 185.5mm
Q(kg)	1.2	1.57	1.72
操作方式	手控	手控	手控

续附表 3—3

型　　号	HAF8B-10	HAF12B-10	HAF20B-10	HAF40B-10
f	8mm	12mm	20mm	40mm
f×	—	—	—	—
F_{max}	1.5	1.5	1.5	1.5
S_{min}	0.5m	0.4m	0.45m	0.5m
b × h	397 × 223mm	221 × 124mm	165 × 93mm	99 × 56mm
$\theta_* \times \theta_*$	61°52′ × 37°17′	43°34′ × 25°19′	26°58′ × 15°21′	13°40′ × 7°42′
MACRO	—	—	—	—
$\phi \times L$	ϕ90 × 148mm	ϕ70 × 118mm	ϕ70 × 118mm	ϕ70 × 118mm
Q(Kg)	0.92	0.6	0.6	0.68
操作方式	手控	手控	手控	手控

附表 3—4 富士依（FUJINON）2/3" 高清晰度摄像机（HD）用摄像镜头

型 号	HA10 × 5E	HA10 × 5.2E	HA15 × 8E
f	5 ~ 50mm	5 2 ~ 52mm	8 ~ 120mm
$f_{2\times}$	10 ~ 100mm	10.4 ~ 104mm	16 ~ 240mm
f ×	10 ×	10 ×	15 ×
F_{max}	1:2.2 (5 ~ 44mm) 1:2.5 (50mm)	1:2.0 (5.2 ~ 37mm) 1:2.5 (52mm)	1:1.9 (8 ~ 103.6mm) 1:2.2 (120mm)
T_{max}	2.4 (5 ~ 44mm) 2.7 (50mm)	2.2 (5.2 ~ 37mm) 2.75 (52mm)	2 (8 ~ 103.6mm) 2.3 (120mm)
S_{min}	0.87m/0.6m	0.6m/0.3m	1m/0.75m
b × h (1 ×)	5mm 1218 × 685mm 50mm 122 × 69mm	5.2mm 628 × 353mm 52mm 53 × 35mm	8mm 843 × 474mm 120mm 56 × 32mm
b × h (2 ×)	10mm 608 × 342mm 100mm 61 × 34mm	10.4mm 314 × 176mm 104mm 31 × 18mm	16mm 421 × 237mm 240mm 28 × 16mm
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (1 ×)	5mm 87°36′ × 56°39′ 50mm 10°57′ × 6°10′	5.2mm 85°21′ × 54°47′ 52mm 10°32′ × 5°56′	8mm 61°52′ × 37°14′ 120mm 4°35′ × 2°34′
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (2 ×)	10mm 51°14′ × 30°10′ 100mm 5°29′ × 3°05′	10.4mm 49°30′ × 29°03′ 104mm 5°17′ × 2°58′	16mm 33°22′ × 19°07′ 240mm 2°17′ × 1°17′
Φ_f	M127 × 0.75	M127 × 0.75	M95 × 1
ϕ × L (H × W × L)	ϕ85 × 226.5mm	ϕ95 × 244.4mm	ϕ100 × 209mm
Q (kg)	1.5kg/1.57kg	1.88kg/1.95kg	1.6kg/1.67kg

续附表 3—4

型　　号	HA20 × 7.5E	HA20 × 7.8E	HA36 × 10.5E
f	7.5 ~ 150mm	7.8 ~ 156mm	10.5 ~ 378mm
$f_{2\times}$	15 ~ 300mm	15.6 ~ 312mm	21 ~ 756mm
f ×	20 ×	20 ×	36 ×
F_{max}	1:2.2 (7.5 ~ 118mm) 1:2.8 (150mm)	1:2.2 (7.8 ~ 146mm) 1:2.5 (156mm)	1:2.2 (10.5 ~ 245mm) 1:3.4 (378mm)
T_{max}	2.4 (7.5 ~ 118mm) 3.0 (150mm)	2.4 (7.8 ~ 146mm) 2.7 (156mm)	2.3 (10.5 ~ 245mm) 3.5 (378mm)
S_{min}	1.23m/0.9m	1.17m/0.9m	3 4m/3m
b × h (1 ×)	7.5mm 1250 × 703mm 150mm 63 × 35mm	7.8mm 1044 × 587mm 156mm 52 × 29mm	10.5mm 2619 × 1472mm 378mm 73 × 41mm
b × h (2 ×)	15mm 645 × 363mm 300mm 32 × 18mm	15.6mm 522 × 293mm 312mm 26 × 15mm	21mm 1310 × 736mm 756mm 36 × 20mm
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (1 ×)	7.5mm 65°11′ × 39°32′ 150mm 3°40′ × 2°03′	7.8mm 63°10′ × 38°07′ 156mm 3°31′ × 1°59′	10.5mm 49°05′ × 28°47′ 378mm 1°27′ × 0°49′
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (2 ×)	15mm 35°27′ × 20°22′ 300mm 1°50′ × 1°02′	15.6mm 34°10′ × 19°36′ 312mm 1°46′ × 0°59′	21mm 25°43′ × 14°38′ 756mm 0°44′ × 0°25′
Φ_F	M107 × 1	M107 × 1	M127 × 0.75
ϕ × L (H × W × L)	ϕ110 × 284mm	ϕ110 × 229.5mm	ϕ130 × 348.5mm
Q (kg)	2.6kg/2.67kg	1.87kg/1.94kg	4.5kg

续附表 3—4

型　　号	HA22 × 7.2E	HA26 × 6.7E	HA66 × 9.5E HA66 × 13.5E*
f	7.2 ~ 158mm	6.7 ~ 175mm	9.5 ~ 625mm 13.5 ~ 890mm*
$f_{2\times}$	14.4 ~ 316mm	13.4 ~ 350mm	19 ~ 1250mm 27 ~ 1780mm*
f ×	22 ×	26 ×	66 ×
F_{max}	1:1.7 (7.2 ~ 149mm) 1:1.8 (158mm)	1:1.5 (6.7 ~ 121mm) 1:2.2 (175mm)	1:2.2 (9.5 ~ 404mm) 1:3.4 (625mm) 1:3.1 (13.5 ~ 563mm)* 1:4.9 (890mm)*
T_{max}	1.9 (7.2 ~ 149mm) 2.0 (158mm)	1.7 (6.7 ~ 121mm) 2.5 (175mm)	2.4 (9.5 ~ 404mm) 3.7 (625mm) 3.4 (13.5 ~ 563mm)* 5.3 (890mm)*
S_{min}	1.2m/0.6m	1.25m/0.6m	3.6m/3m
b × h (1 ×)	7.2mm　1047 × 589mm 158mm　48 × 27mm	6.7mm　1077 × 606mm 175　41 × 23mm	9.5mm　2806 × 1577mm 625mm　43 × 24mm 13.5mm　1975 × 1110mm* 890mm　30 × 17mm*
b × h (2 ×)	14.4mm　524 × 295mm 316mm　24 × 13mm	13.4mm　539 × 303mm 350mm　21 × 12mm	19mm　1403 × 788mm 1250mm　21 × 12mm 27mm　989 × 556mm* 1780mm　15 × 8mm*
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (1 ×)	7.2mm　67°20′ × 41°03′ 158mm　3°29′ × 1°57′	6.7mm　71°11′ × 43°49′ 175mm　3°08′ × 1°46′	9.5mm　53°34′ × 31°41′ 625mm　0°53′ × 0°30′ 13.5mm　39°07′ × 22°35′* 890mm　0°37′ × 0°21′*
Φ_F	–	–	–
ϕ × L (H × W × L)	228 × 231 × 543mm	228 × 231 × 599mm	253 × 253 × 608mm 253 × 253 × 622mm*
Q (kg)	19.5kg	22kg	21kg 22kg*

附表 3—5　　富士依(FUJINON)2/3"EFP 电视摄像镜头

型　　号	Ah20 × 8E	Ah24 × 7E	Ah55 × 9.5E
f (I_{2s})	(1 ×)8 ~ 160mm (2 ×)16 ~ 320mm	(1 ×)7 ~ 168mm (2 ×)14 ~ 336mm	(1 ×)9.5 ~ 525mm (2 ×)19 ~ 1050mm
f ×	20 ×	24 ×	55 ×
F_{max}	1:1.5(8 ~ 110mm) 1:2.2(160mm)	1:1.5(7 ~ 126mm) 1:2.0(168mm)	1:1.4(9.5 ~ 253mm) 1:2.9(525mm)
S_{min}	0.6m	0.6m	2.4m
b × h	8mm　809 × 607mm 160mm　40 × 30mm	7mm　988 × 741mm 168mm　41 × 31mm	9.5mm　2028 × 1521mm 525mm　37 × 28mm
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (1 ×)	8mm　57°37′ × 44°50′ 160mm　3°09′ × 2°22′	7mm　64°18′ × 50°29′ 168mm　3°00′ × 2°15′	9.5mm　49°42′ × 38°19′ 525mm　0°58′ × 0°43′
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (2 ×)	16mm　30°45′ × 23°18′ 320mm　1°35′ × 1°11′	14mm　34°54′ × 26°32′ 336mm　1°30′ × 1°08′	19mm　26°05′ × 19°42′ 1050mm　0°29′ × 0°22′
H × W × L	228 × 231 × 480mm	228 × 231 × 530mm	252 × 252 × 573mm
Q(kg)	15.3	18.1	18.4

续附表 3—5

型　　号	Ah70 × 9.5E	Ah70 × 13.5E*	Ah80 × 9.5E Ah80 × 13.5E*
f (f_{2x})	(1 ×)9.5 ~ 665mm (2 ×)19 ~ 1330mm	(1 ×)13.5 ~ 945mm* (2 ×)27 ~ 1890mm	(1 ×)9.5 ~ 760mm (2 ×)19 ~ 1520mm (1 ×)13.5 ~ 1080mm (2 ×)27 ~ 2160mm
f ×	70 ×	70 ×	80 ×
F_{max}	1:1.6(9.5 ~ 313mm) 1:3.4(665mm)	1:2.3(13.5 ~ 445mm)* 1:4.8(945mm)*	1:1.8(9.5 ~ 351mm) 1:3.9(760mm) 1:2.5(13.5 ~ 491mm)* 1:5.5(1080mm)
S_{min}	2.7m	2.7m(13.5 ~ 135mm) 4m(136 ~ 945mm)*	2.7m 2.7m(13.5 ~ 135mm)/4m(136 ~ 1080mm)*
b × h	9.5mm 2295 × 1721mm 665mm 33 × 25mm	13.5mm 1615 × 1211mm* 945mm 35 × 26mm*	9.5mm 2297 × 1723mm 760mm 29 × 22mm 13.5mm 1616 × 1212mm* 1080mm 31 × 23mm*
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (1 ×)	9.5mm 49°42′ × 38°19′ 665mm 0°45′ × 0°34′	13.5mm 36°06′ × 27°28′* 945mm 0°32′ × 0°24′*	9.5mm 49°42′ × 38°19′ 760mm 0°40′ × 0°30′ 13.5mm 36°06′ × 27°28′* 1080mm 0°28′ × 0°21′*
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$ (2 ×)	19mm 26°05′ × 19°42′ 1330mm 0°23′ × 0°17′	27mm 18°31′ × 13°56′* 1890mm 0°16′ × 0°12′*	19mm 26°05′ × 19°42′ 1520mm 0°20′ × 0°15′ 27mm 18°31′ × 13°56′ 2160mm 0°14′ × 0°11′*
H × W × L	252 × 252 × 602mm	252 × 252 × 628mm*	252 × 252 × 625mm 252 × 252 × 651mm*
Q(kg)	20	20.5	20.5 21*

附表 3—6　　富士依(FUJINON)2/3"ENG 电视摄像镜头

型　号	A10×4.8E	A12×6.8	A17×7.8E	A17×9
f ($f_{2\times}$)	(1×)4.8 – 48mm (2×)9.6 – 96mm	6.8 – 82mm	(1×)7.8 – 133mm (2×)15.6 – 266mm	9 – 153mm
f×	10×	12×	17×	17×
F_{max}	1:1.8(4.8 – 34mm) 1:2.3(48mm)	1:2.5(6.8 – 76mm) 1:2.7(82mm)	1:1.8(7.8 – 109mm) 1:2.2(133mm)	1:1.9(9 – 115mm) 1:2.6(153mm)
S_{min}	0.3m	0.5m	0.6m	0.9m
h×h	4.8mm 624×468mm 48mm 62×47mm	6.8mm 645×483mm 82mm 53×40mm	7.8mm 659×494mm 133mm 39×29mm	9mm 815×611mm 153mm 48×36mm
$\theta_{水}\times\theta_{垂}$	4.8mm 85°01′×69°01′ 48mm 10°28′×7°52′	6.8mm 65°49′×51°46′ 82mm 6°09′×4°37′	7.8mm 58°51′×45°52′ 133mm 3°47′×2°51′	9mm 52°06′×40°16′ 153mm 3°18′×2°28′
M_{acro}	有	有	有	有
Φ_f	M127×0.75	M95×1	M82×0.75	M82×0.75
$\phi\times L$	ϕ95×244mm	ϕ100×196.3mm	ϕ85×198mm	ϕ85×178mm
Q(kg)	1.82/1.89	1.43	1.48/1.55	1.25

续附表 3—6

型　号	A19 × 8.7/E˙	A22 × 7.8E	A24 × 11.5E A24 × 16.5E˙	A36 × 10.5E A36 × 14.5E˙
f ($f_{2\times}$)	(1 ×)8.7 – 165mm (2 ×)17.4 – 330mm	(1 ×)7.8 – 172mm (2 ×)15.6 – 344mm	(1 ×)11.5 – 276mm (2 ×)23 – 552mm (1 ×)16.5 – 400mm˙ (2 ×)33 – 800mm˙	(1 ×)10.5 – 378mm (2 ×)21 – 756mm (1 ×)14.5 – 520mm˙ (2 ×)29 – 1040mm˙
f ×	19 ×	22 ×	24 ×	36 ×
F_{max}	1:1.8(8.7 – 114mm) 1:2.6(165mm)	1:1.8(7.8 – 124mm) 1:2.5(172mm)	1:2.0(11.5 – 207mm) 1:2.7(276mm) 1:2.8(16.5 – 290mm)˙ 1:3.9(400mm)˙	1:2.0(10.5 – 222mm) 1:3.4(378mm) 1:2.7(14.5 – 305mm)˙ 1:4.6(520mm)˙
S_{min}	0.9m	0.8m	1.8m	2.2m
b × h	8.7mm 862 × 647mm 165mm 45 × 34mm	7.8mm 842 × 632mm 172mm 38 × 29mm	11.5mm 1296 × 972mm 276mm 54 × 41mm 16.5mm 903 × 678mm 400mm 37 × 28mm	10.5mm 1726 × 1295mm 378mm 48 × 36mm 14.5mm 1250 × 938mm˙ 520mm 35 × 26mm˙
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$	8.7mm 53°39′ × 41°33′ 165mm 3°03′ × 2°17′	7.8mm 58°51′ × 45°52′ 172mm 2°56′ × 2°12′	11.5mm 41°52′ × 32°01′ 276mm 1°49′ × 1°22′ 16.5mm 29°51′ × 22°37′ 400mm 1°15′ × 0°56′	10.5mm 45°28′ × 34°54′ 378mm 1°20′ × 1°00′ 14.5mm 33°46′ × 25°39′˙ 520mm 0°58′ × 0°44′˙
M_{auto}	有	有	有	有
Φ_F	M82 × 0.75	M95 × 1	M107 × 1	M127 × 0.75
ϕ × L	ϕ85 × 200.3mm	ϕ100 × 215.6mm	ϕ110 × 261mm ϕ110 × 270mm˙	ϕ130 × 341.5mm ϕ130 × 363.3mm˙
Q(kg)	1.35/1.45	1.72/1.79˙	2.9 2.9˙	4.5 4.58˙

附表 3—7　　佳能(CANON)2/3"摄像管用摄像镜头(便携式)

型　号	J13×9B IRS	J14×8B IRS	J15×9.5B KRS	J18×8.5B IRS	J18×9 IRS
	B3 型 B4 型	B3 型 B4 型	B3 型 B4 型	B3 型 B4 型	B4 型
f	9 ~ 117	8 ~ 112	9.5 ~ 143	8.5 ~ 153	9 ~ 162
$f_{2\times}$	18 ~ 234	16 ~ 224		17 ~ 306	18 ~ 324
f_z	13×	14×	15×	18×	18×
F_{max}	1:1.6(f=9~99) 1:1.9(f=117)	1:1.7(f=8~91) 1:2.1(f=112)	1:1.8(f=9.5~112) 1:2.3(f=143)	1:1.7(f=8.5~113) 1:2.3(f=153)	1:1.7(f=9~116) 1:2.4(f=162)
$F_{max}(2\times)$	1:3.2(f=18~198) 1:3.8(f=234)	1:3.4(f=16~182) 1:4.2(f=224)		1:3.4(f=17~226) 1:4.6(f=306)	1:3.4(f=18~232) 1:4.8(f=324)
S_{min}	0.8	0.7	1	0.9	0.9
$\theta_{水}\times\theta_{垂}$	52.1°×40.3°(9) 4.3°×3.2°(117)	57.6°×44.8°(8) 4.5°×3.4°(112)	49.7°×38.3°(9.5) 3.5°×2.6°(143)	54.7°×42.4°(8.5) 3.3°×2.5°(153)	52.1°×40.3°(9) 3.1°×2.3°(162)
$\theta_{水}\times\theta_{垂}$ (2×)	27.5°×20.8°(18) 2.2°×1.6°(234)	30.8°×23.3°(16) 2.3°×1.7°(224)		29°×22°(17) 1.6°×1.2°(306)	27.5°×20.8°(18) 1.6°×1.2°(324)
b×h	72.2°×54.2°(9) 5.6°×4.2°(117)	87.8°×65.9°(8) 6.1°×4.6°(112)	86.2°×64.6°(9.5) 5.7°×4.3°(143)	86.7°×64.7°(8.5) 4.9°×3.6°(153)	80.2°×60.2°(9) 4.5°×3.4°(162)
b×h (2×)	36.1°×27.1°(18) 2.8°×2.1°(234)	43.1°×32.3°(16) 3.1°×2.3°(224)		43.1°×32.3°(17) 2.4°×1.8°(306)	40.1°×30.1°(18) 2.3°×1.7°(324)
f_F	58　48	58　48	58　48	58　48	48
B×H×L	140.5×96×187	131×106×243.5	125×95×165.4	140.5×101×214	133×101×195
Q(kg)	1.29	2.4	1.5	1.57	1.7
US $	5850	12000	3620	10400	

附表 3—8　　佳能(CANON)2/3"摄像管用摄像镜头(广播级用)

型　　号	J50×9.5BIE	J45×9.5BIE	J40×9.5BIE	J25×11.5BIE	J20×8.5BIE	J18×8BIE	J14×9BIE
f	9.5 ~ 475	9.5 ~ 430	9.5 ~ 380	11.5 ~ 288	8.5 ~ 170	8 ~ 144	9 ~ 126
f_x	50×	45×	40×	25×	20×	18×	14×
F_{max}	1:1.4(f=9.5 ~ 202) 1:3(f=475)	1:1.7(f=9.5 ~ 201) 1:3(f=430)	1:1.2(f=9.5 ~ 190) 1:2(f=380)	1:1.6(f=11.5 ~ 219) 1:2.1(f=288)	1:1.6(f=8.5 ~ 129.5) 1:2.1(f=170)	1:1.2(f=8 ~ 123) 1:1.4(f=144)	1:1.2(f=9 ~ 126)
F_{max} (2×)			1:1.4(f=9.5 ~ 240) 1:2(f=380)				
S_{min}	2.2	1.8	2.5	1.5	0.6	0.6	0.7
$\theta_{水} \times \theta_{垂}$	49.7°×38.3° (9.5) 1.1°×0.8° (475)	49.7°×38.1° (9.5) 1.2°×0.9° (430)	49.7°×38.3° (9.5) 1.3°×1° (380)	41.9°×32° (11.5) 1.8°×1.3° (288)	54.7°×42.4° (8.5) 3°×2.2° (170)	57.6°×44.8° (8) 3.5°×2.6° (144)	52.1°×40.3° (9) 4°×3° (126)
b×h	180×135 (9.5) 3.6×2.7 (475)	148×111 (9.5) 3.3×2.5 (430)	205×154 (9.5) 5×3.8 (380)	101.9×76.5 (11.5) 4.1×3.1 (288)	82.1×60.4 (8.5) 3.9×3 (380)	87.7×65.8 (8) 4.7×3.5 (144)	89.1×66.8 (9) 6.2×4.7 (126)
H×B×L	240×258 ×485	250×235 ×389	280×309 ×644.6	190×200 ×370	180×175 ×380	270×285 ×557	260×286.5 ×518.5
Q(kg)	17.5	14	30	10	8	27	22
US $		33400	47800	28100	25900	29640	26620

附表 3—9　　尼柯（NIKKOR）2/3″摄像管用摄像镜头

型　　号	S15×8.5B	S13×9B
f×	15×	13×
f	8.5—127.5	9—117
$f_{2\times}$	17—255	18—234
F_{max}	1:1.7（8.5—87） 1:2.2（127.5）	1:1.7（9—80） 1:2.0（117）
S_{min}	0.8	0.8
$\theta_{水}\times\theta_{垂}$	8.5:54.7°×42.4° 127.5:4.0°×3.0°	9:52.1°×40.3° 117:4.3°×3.2°
b×h（cm）	76.4×57.5 5.3×4.0	9:72.2×54.2 117:5.6×4.2
M_{acro}	提供	提供
B×H×L（B1-E）	122.5×94.5×179	117.5×93×170.5
B×H×L（B2－E）	122.5×94.5×180	117.5×93×168.5
Q（Kg.B1－E）	约 1.25	约 1.1
Q（Kg.B2－E）	约 1.3	约 1.15
操作方式	变焦距：伺服/手动 光　圈：自动/手动/推动-自动 聚　焦：手动	

附录四 国外摄影镜头、照相机外文名称与译名对照表

英文名称	中文译名	生产国家	其他译名
Access	阿塞斯	日	爱撒
Achiever	阿奇沃	香港	雅奇
Agfa	阿克发	德	爱克发
Alpa	阿尔帕	瑞士	爱拍
Angénieux	昂热尼厄	法	安琴
Arri	阿莱	德	阿里
Art	阿尔特	瑞士	
Asahi	旭（旭光）	日	朝日
Atoron	阿托隆	日	
Balda	巴尔达	德	宝达
Boots	布茨	日	
Bossy	波赛	日	
Broadway	布罗德韦	日	百老汇
Bronica	勃朗尼卡	日	碧浪之家
Calumet	卡路美特	美	
Cambo	卡宝	瑞士	金宝、坎宝
Canon	佳能（卡侬）	日	锦囊
Canonet	卡侬乃特	日	
Carena	卡伦娜	列支敦士登	
Carl·Zeiss	卡尔·蔡司	德	
Carl·Zeiss·Jena	卡尔·蔡司·耶那	原东德	
Chinon	启侬	日	智囊
Cimko	西姆科	日	摄美
Colora	考洛拉	德	
Comet	康麦特	意	
Contarex	康太力克斯	德	康泰力时
Contax	康太克斯	德	康泰时
Cooke	柯克	英	
Copal	考派尔	日	
Corton	科汤	日	高登
Cosina	考西娜	日	确善能
Cosinon	考西侬	日	
Cosmic Symbol	宇宙号	苏	
Cosmorex	考斯摩雷克斯	日	
Dacora	达柯拉	德	
Dia	迪亚	美	钻石
Elmo	爱尔慕	日	爱慕
Exakta	爱克赛太	原东德	爱撒他
Fed	费德	苏	
Fuji	富士	日	
Fujica	富士卡	日	富撒卡
Fujinon	富士侬	日	
Fura	富拉	法	
Gaf	加夫	英	
Goko	高科	日	
Guppy	古派	瑞士	
Halina	哈林娜	港	
Hanimex	哈尼梅克斯	日港	恒利
Hansa	汉萨	日	
Hasselblad	哈苏	瑞典	哈色（哈色）

英文名称	中文译名	生产国家	其他译名
			勒莱德）
Heidescop	海德斯可普	德	
Hexanon	赫克萨侬	日	
Hologen	霍洛贡	德	骑士
Horseman	霍斯曼	日	保谷
Huya	豪业	日	地平线
Hroizont	好洛丛	苏	
Instamatic	英斯塔迈蒂克	日	摄等得
Instantlod	英斯顿罗德	美港	
Instaplus	英斯塔普鲁	日	爱图丽
Itorex	伊托雷克斯	日	
Kenko	肯科	日	金鹿
kenlock	肯洛克	日	
Keystone	凯斯通	英美	
Kiev	基辅	苏	确宝亮
Koboron	科博洛恩	日	
Kodak	柯达	美	高坚
Kokin	科金	法	康艺佳
Konica	柯尼卡	日	
Kompak	柯尼派克	日	兴和
Kowa	柯瓦	日	
Leica	莱卡	德	
Leicaflex	莱卡弗莱克斯	德	
Leitz	莱兹	德	
Lemngrad	列宁格勒	苏	
Linhof	林哈夫	德	
Lubitel	爱好者	苏	

英文名称	中文译名	生产国家	其他译名
Magimatic	玛吉玛蒂克	美	
Makina	玛开纳	日	美佳
Makinette	玛开乃提	德	
Makinon	玛开侬	日	
Mamiya	玛米亚	日	万美雅
Micromagic	微型梅吉克	港	
Minolta	美能达（米诺尔它）	日	万能达
Minox	米诺克司	德	美乐时
Miranda	米兰达	日	美年达
Miyaki	米亚开	日	美奇
Mupi	姆皮	意	
Nalcan	纳尔康	日	
National	松下	日	乐声
Nera	耐拉	西班牙	
Nikkor	尼柯	日	
Nikkomat	尼康玛特	日	艺康美
Nikon	尼康	日	艺康
Nikonus	尼康诺斯	日	
Norita	诺里它	日	
Olympus	奥林巴斯	日	
Omega	奥米茄	日	
Optima	奥普蒂玛	德	
Opton	欧波同	德	
Osanon	奥萨侬	日	
Osawa	奥萨瓦	日	
Ozunon	奥兹侬	日	晶莹
Panagor	潘那高	日	
Paragor	帕拉高	日	
Pentacon	潘太康	原东德	
Pentax	潘太克斯	日	宾得

英文名称	中文译名	生产国家	其他译名
Permalite	培玛克斯	美	
Petri	培脱利	日	白丽
Photax	福太克斯	日	宝得
Plaubel – makina	普鲁贝尔	德	
Polaroid	波拉（波拉洛依德）	美	宝丽莱 拍立得
Praktica	普拉蒂卡	原东德	白佳
Prinz	普伦兹	港	
Profia	普鲁菲亚	日	
Promura	普罗穆拉	日	宝利
Prontor	普浪多	德	
Prontor – reflex	普浪多弗莱克斯	德	
Rank	伦克	意	
Rapid	拉皮德	德	
Regula	雷格拉	德	
Ricoh	理光	日	丽确
Rikenon	理升依	日	
Rittrech – View	雷克提福	日	
Robot	罗伯特	德	
Rodens – tock	罗敦司特	德	
Rollei	罗莱	德	禄来
Rolleiflex	罗莱弗莱克斯	德	禄来福来
Roscley	罗赛利	德	罗利
Roto	罗托	瑞士	
Sakura	樱花	日	
Schneider	施耐德	德	
Sedic	山迪克	日	
Sekor	塞柯	日	
Serena	山列娜	日	
Shackman	歇克曼	英	
Sigma	西格玛	日	适马、仙美
Silette	雪立特	德	
Sinar	仙娜	瑞士	
Sinker	辛加	美	
Smena	斯灭娜	苏	接班人
Soligor	索立哥	日	秀丽
Sopod	索宝脱	苏	
Spead – mastr	斯比脱玛斯特	意	
Sun	萨恩	日	太阳
Sunpak	森派克	日	新霸
Swttar	斯威它	瑞士	
S&K		日	
Tamron	腾龙	日	
Tasco	德士古	美	
Tefnon	蒂弗农	日	特龙
Tokina	托开纳	日	图丽
Topcon	托普康	日	特强
Topman	托普曼	日	
Torest	托利丝	苏	
Toyo	东洋	日	星座
Turdo – matic	土多玛蒂克	新加坡	
Unika	尤尼卡	法	
Vitoret	威托雷特	德	
Vivitar	威威塔	美	威达
Voigtlander	沃格兰德	德	福伦达
Werlisa	威里萨	日	
Widelux	威德勒克司	日	威力士
Wista	威斯塔	日	
Yashica	雅西卡	日	影摄佳
Yashinon	雅西依	日	
Zeiss· Ikon	蔡司·伊康	德	
Zenit	泽尼特	苏	
Zenzanon	泽扎依	日	吉野
Zorki	卓尔基	苏	
Zuiko	兹依柯	日	
アー卜	阿托	日	